

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局(43) 国際公開日  
2003年1月23日 (23.01.2003)

PCT

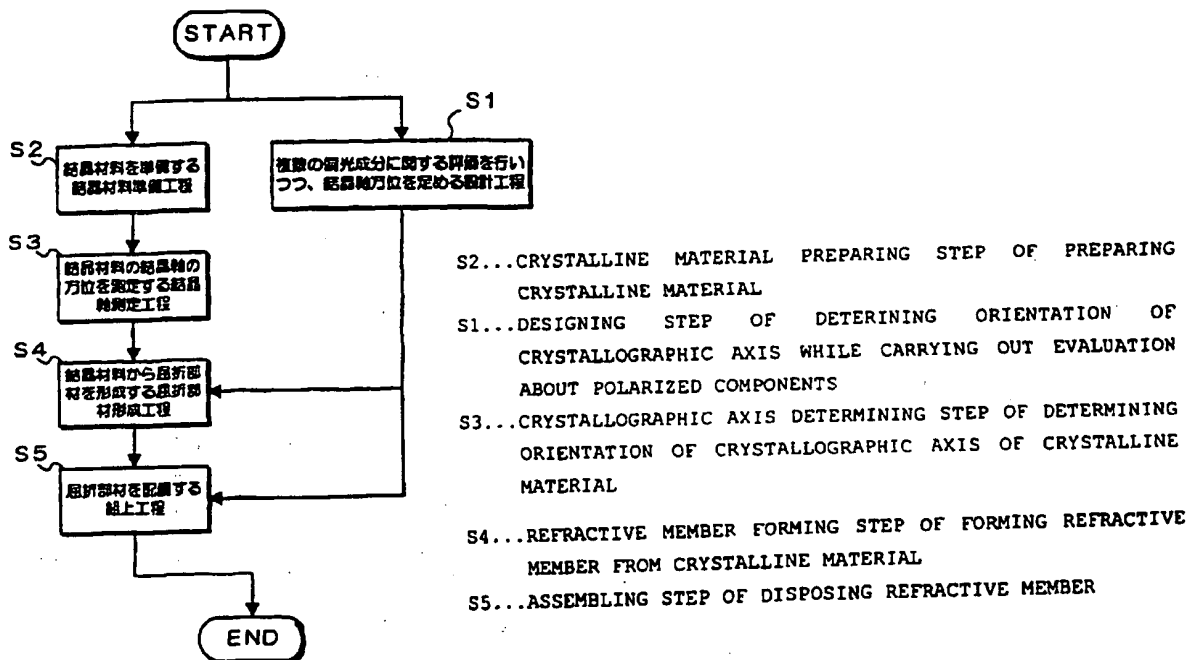
(10) 国際公開番号  
WO 03/007045 A1

- (51) 国際特許分類: G02B 7/02, H01L 21/02, (72) 発明者: 藤島 洋平 (FUJISHIMA, Youhei); 〒100-8331 東京都千代田区丸の内三丁目2番3号 株式会社ニコン内 Tokyo (JP). 池沢 弘範 (IKEZAWA, Hironori); 〒100-8331 東京都千代田区丸の内三丁目2番3号 株式会社ニコン内 Tokyo (JP). 小澤 稔彦 (OZAWA, Toshihiko); 〒100-8331 東京都千代田区丸の内三丁目2番3号 株式会社ニコン内 Tokyo (JP). 大村 泰弘 (OMURA, Yasuhiro); 〒100-8331 東京都千代田区丸の内三丁目2番3号 株式会社ニコン内 Tokyo (JP). 鈴木 剛司 (SUZUKI, Takeshi); 〒100-8331 東京都千代田区丸の内三丁目2番3号 株式会社ニコン内 Tokyo (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP02/07017
- (22) 国際出願日: 2002年7月10日 (10.07.2002)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願2001-208837 2001年7月10日 (10.07.2001) JP  
特願2001-257809 2001年8月28日 (28.08.2001) JP
- (74) 代理人: 長谷川 芳樹, 外 (HASEGAWA, Yoshiki et al.); 〒104-0061 東京都中央区銀座二丁目6番12号 大倉本館 創英国際特許法律事務所 Tokyo (JP).
- (71) 出願人: 株式会社ニコン (NIKON CORPORATION) [JP/JP]; 〒100-8331 東京都千代田区丸の内三丁目2番3号 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU,

[続葉有]

(54) Title: PROJECTION OPTICAL SYSTEM PRODUCTION METHOD

(54) 発明の名称: 投影光学系の製造方法



(57) Abstract: A method for producing a projection optical system for focusing a light of a predetermined wavelength to form on a second plane a second image of a first image formed on a first plane. The optical system includes a refractive member made of at least one crystalline material of isometric system and having a transmittance to a light with a predetermined wavelength. The method comprises a designing step of acquiring predetermined design data, the designing step including a substep of determining the orientation of the crystallographic

[続葉有]

BEST AVAILABLE COPY

WO 03/007045 A1



ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR), OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

(84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR,

2 文字コード及び他の略語については、定期発行される各 PCT ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

axis of a refractive member made of at least one crystalline material of isometric system while carrying out evaluation about a light having a first polarized component and a second polarized component different from the first one, a crystalline material preparing step for preparing the crystalline material, a crystal axis determining step of determining the crystal axis of the crystalline material, a refractive member forming step of forming the refractive member of predetermined shape from the crystalline material, and an assembling step of disposing the refractive member depending on the orientation of the crystallographic axis of the refractive member determined at the designing step.

(57) 要約:

本発明は、所定波長の光に基づいて第 1 面の像を第 2 面上に結像する投影光学系であって、所定波長の光に対して透過性を有する少なくとも 1 つの等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材を含む投影光学系の製造方法であって、第 1 の偏光成分及び該第 1 の偏光成分とは異なる第 2 の偏光成分の光に関する評価を行いつつ、少なくとも 1 つの等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材の結晶軸の方位を定める補助工程を含み、所定の設計データを得る設計工程と、等軸晶系の結晶材料を準備する結晶材料準備工程と、この等軸晶系の結晶材料の結晶軸を測定する結晶軸測定工程と、この設計工程での設計データに基づいて、等軸晶系の結晶材料から所定形状の屈折部材を形成する屈折部材形成工程と、設計工程で得られた屈折部材の結晶軸方位に基づいて、屈折部材を配置する組上工程とを含む投影光学系の製造方法を提供する。

## 明細書

### 投影光学系の製造方法

#### 技術分野

5 本発明は、投影光学系、当該投影光学系の製造方法、及び当該投影光学系を備えた露光装置に関し、特に半導体素子や液晶表示素子などのマイクロデバイスをフォトリソグラフィ工程で製造する際に使用される露光装置に好適な投影光学系に関するものである。

#### 背景技術

10 半導体集積回路や液晶ディスプレイ等の電子デバイス（マイクロデバイス）の微細パターンの形成に際して、形成すべきパターンを4～5倍程度に比例拡大して描画したフォトマスク（レチクルとも呼ぶ）のパターンを、投影露光装置を用いてウエハ等の感光性基板（被露光基板）上に縮小露光転写する方法が用いられている。この種の投影露光装置では、半導体集積回路の微細化に対応するために、その露光波長が短波長側へシフトし続けている。

15 現在、露光波長はKrFエキシマレーザの248nmが主流となっているが、より短波長のArFエキシマレーザの193nmも実用化段階に入りつつある。さらに、波長157nmのF<sub>2</sub>レーザや波長146nmのKr<sub>2</sub>レーザ、波長126nmのAr<sub>2</sub>レーザ等の、いわゆる真空紫外域と呼ばれる波長帯の光を供給する光源を使用する投影露光装置の提案も行なわれている。また、投影光学系の大開口数（NA）化によっても高解像度化が可能であるため、露光波長の短波長  
20 化のための開発だけでなく、より大きい開口数を有する投影光学系の開発もなされている。

このように波長の短い紫外域の露光光に対しては、透過率や均一性の良好な光学材料（レンズ材料）は限定される。ArFエキシマレーザを光源とする投影光学系では、レンズ材料として合成石英ガラスも使用可能であるが、1種類のレン  
25 ズ材料では色収差の補正を十分に行うことができないので、一部のレンズにフッ

化カルシウム結晶（蛍石）が用いられる。一方、 $F_2$  レーザを光源とする投影光学系では、使用可能なレンズ材料は実質上フッ化カルシウム結晶（蛍石）に限定される。

#### 発明の開示

5       最近、このように波長の短い紫外線に対しては、立方晶系であるフッ化カルシウム結晶（蛍石）においても、固有複屈折が存在することが報告されている。電子デバイスの製造に用いられる投影光学系のような超高精度の光学系においては、レンズ材料の複屈折に伴って生じる収差は致命的であり、複屈折の影響を実質的に回避したレンズ構成およびレンズ設計の採用が不可欠である。

10       本発明は、前述の課題に鑑みてなされたものであり、例えば蛍石のような固有複屈折を示す結晶材料を用いても、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を確保することを目的とする。

15       上述の目的を達成するために、本発明の請求項1に係る発明は、所定波長の光に基づいて第1面の像を第2面上に結像する投影光学系であって前記所定波長の光に対して透過性を有する少なくとも1つの等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材を含む投影光学系の製造方法である。そして、第1の偏光成分及び該第1の偏光成分とは異なる第2の偏光成分の光に関する評価を行いつつ、前記少なくとも1つの等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材の結晶軸の方位を定める補助工程を含み、所定の設計データを得る設計工程と；前記等軸晶系の結晶材料を準備する  
20       結晶材料準備工程と；前記等軸晶系の結晶材料の結晶軸を測定する結晶軸測定工程と；前記設計工程での前記設計データに基づいて、前記等軸晶系の結晶材料から所定形状の屈折部材を形成する屈折部材形成工程と；前記設計工程で得られた前記屈折部材の結晶軸方位に基づいて、前記屈折部材を配置する組上工程と；を含むことを特徴とする。

25       この発明によれば、等軸晶系の結晶材料に起因する複屈折の影響を複数の偏光成分に関して評価しつつ、この等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材の結晶軸の

組み込み角度を複屈折の影響が極小となるように定めることが可能であるため、良好な光学性能を確保できる。

更に、上述の目的を達成するために、本発明の請求項 16 に係る発明は、所定波長の光に基づいて第 1 面の像を第 2 面上に結像する投影光学系であって、前記  
5 所定波長の光に対して透過性を有する少なくとも 1 つの等軸晶系の結晶材料からなる等軸晶系屈折部材と；該等軸晶系屈折部材が有する固有複屈折による光学性能の悪化を補償するための非結晶材料からなる非結晶屈折部材と；を備えることを特徴とする。

この発明によれば、等軸晶系の結晶材料からなる等軸晶系屈折部材が有する固有複屈折による光学性能の悪化を、非結晶屈折部材により補償することが可能であるため、良好な光学性能を確保することが可能である。

また、上述の目的を達成するために、更に本発明に係る発明は、所定波長の光に基づいて第 1 面の像を第 2 面上に結像する投影光学系であって、前記所定波長の光に対して透過性を有する双晶からなる双晶屈折部材を備えていることを特徴  
15 とする。

双晶は、互いに接している同一相の 2 つの結晶が所定の共通の低指数の結晶軸のまわりに  $180^\circ$  回転した方位関係となっているもの、或いは互いに接している同一相の 2 つの結晶が所定の結晶面に関して鏡像関係となっているものである。この双晶を投影光学系中の結晶屈折部材として用いることで、複屈折の影響が双  
20 晶面又は双晶境界の前後で互いに逆向きとなるため、結晶屈折部材全体では固有複屈折による光学性能の悪化を低減することが可能である。これにより、投影光学系の光学性能を確保することが可能となる。

なお、本発明の請求の範囲中、第 1 群の光透過部材と第 2 群の光透過部材とが光軸を中心としてほぼ  $45^\circ$  だけ相対的に回転した位置関係を有するとは、第 1  
25 群の光透過部材および第 2 群の光透過部材における光軸とは異なる方向に向けられた所定の結晶軸（たとえば結晶軸  $[010]$ 、 $[001]$ 、 $[01-1]$ 、または  $[0$

1 1]) 同士の光軸を中心とした相対的な角度がほぼ  $45^\circ$  であることを意味する。  
なお、結晶軸  $[100]$  を光軸とする場合には、光軸を中心とした複屈折の影響  
の回転非対称性が  $90^\circ$  の周期で現れるため、光軸を中心としてほぼ  $45^\circ$  だけ  
相対的に回転した位置関係を有することは、光軸を中心としてほぼ  $45^\circ + (n$   
5  $\times 90^\circ)$  だけ相対的に回転した位置関係を有することと同じ意味である ( $n$  は  
整数である)。

また、本発明の請求の範囲中、第3群の光透過部材と第4群の光透過部材とが  
光軸を中心としてほぼ  $60^\circ$  だけ相対的に回転した位置関係を有するとは、第3  
群の光透過部材および第4群の光透過部材における光軸とは異なる方向に向けら  
10 れた所定の結晶軸 (たとえば結晶軸  $[-111]$ 、 $[11-1]$ 、または  $[1-11]$ )  
同士の光軸を中心とした相対的な角度がほぼ  $60^\circ$  であることを意味する。なお、  
結晶軸  $[111]$  を光軸とする場合には、光軸を中心とした複屈折の影響の回転  
非対称性が  $120^\circ$  の周期で現れるため、光軸を中心としてほぼ  $60^\circ$  だけ相対  
的に回転した位置関係を有することは、光軸を中心としてほぼ  $60^\circ + (n \times 1$   
15  $20^\circ)$  だけ相対的に回転した位置関係を有することと同じ意味である ( $n$  は整  
数である)。

また、本発明の請求の範囲中、第5群の光透過部材と第6群の光透過部材とが  
光軸を中心としてほぼ  $90^\circ$  だけ相対的に回転した位置関係を有するとは、第5  
群の光透過部材および第6群の光透過部材における光軸とは異なる方向に向けら  
20 れた所定の結晶軸 (たとえば結晶軸  $[001]$ 、 $[-111]$ 、 $[-110]$ 、または  
 $[1-11]$ ) 同士の光軸を中心とした相対的な角度がほぼ  $90^\circ$  であることを意  
味する。なお、結晶軸  $[110]$  を光軸とする場合には、光軸を中心とした複屈  
折の影響の回転非対称性が  $180^\circ$  の周期で現れるため、光軸を中心としてほぼ  
 $90^\circ$  だけ相対的に回転した位置関係を有することは、光軸を中心としてほぼ  $9$   
25  $0^\circ + (n \times 180^\circ)$  だけ相対的に回転した位置関係を有することと同じ意味  
である ( $n$  は整数である)。

## 図面の簡単な説明

図 1 は本発明の第 1 実施例による投影光学系の製造方法の概略を示すフローチャートである。

5 図 2 は本発明の第 1 実施例における設計工程 S 1 を概略的に示すフローチャートである。

図 3 は本発明の第 1 実施例における投影光学系の光学性能の評価点の一例を示す図である。

図 4 は本発明の第 1 実施例におけるステップ S 1 2 の詳細を説明するためのフローチャートである。

10 図 5 は本発明の第 1 実施例における等軸晶系の結晶材料の結晶軸方位を説明するための図である。

図 6 は本発明の第 1 実施例における結晶材料準備工程 S 2 の詳細を示すフローチャートである。

図 7 はラウエカメラを概略的に示す図である。

15 図 8 は複屈折測定機の概略的な構成を示す図である。

図 9 はレンズの面形状の誤差測定するための干渉計装置の概略的な構成を示す図である。

図 10 は本発明の第 2 実施例による投影光学系の製造方法の概略を示すフローチャートである。

20 図 11A、図 11B 及び図 11C は複数の等軸晶系の結晶材料の組み合わせによって固有複屈折を低減させる手法の一例を示す図である。

図 12 は屈折率の絶対値及び屈折率分布を測定するための干渉計装置を概略的に示す図である。

25 図 13 は本発明の第 2 実施例に係る投影光学系の製造方法の組上工程 S 5 の詳細を示すフローチャートである。

図 14 は位相回復法の原理を用いる収差測定装置を概略的に示す図である。

図 15 は本発明の第 2 実施例に係る投影光学系の外部調整機構を概略的に示す図である。

図 16A、図 16B 及び図 16C は非球面が形成される光学部材及び／又は複屈折分布が変更される光学部材を説明するための図である。

5 図 17 は第 1 実施例又は第 2 実施例に従って製造された投影光学系を備えた露光装置を概略的に示す図である。

図 18A、図 18B 及び図 18C は複数の等軸晶系の結晶材料の組み合わせによって固有複屈折を低減させる手法の一例としての第 4 実施例の投影光学系を模式的に示す図及び部材 51a 及び 51b の結晶方向を示す図である。

10 図 19 は複数の等軸晶系の結晶材料の組み合わせによって固有複屈折を低減させる手法の一例としての第 5 実施例の投影光学系を模式的に示す図である。

図 20 は複数の等軸晶系の結晶材料の組み合わせによって固有複屈折を低減させる手法の一例としての第 8 実施例の投影光学系を模式的に示す図である。

15 図 21 は本発明に係る数値実施例としての第 1 実施例にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図である。

図 22A、図 22B 及び図 22C は第 1 実施例における投影光学系の点像強度分布を示す。

図 23A 及び図 23B は第 1 実施例における投影光学系の点像強度分布を示す。

20 図 24 は本発明に係る数値実施例としての第 2 実施例にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図である。

図 25A、図 25B、図 25C 及び図 25D は第 2 実施例における投影光学系の点像強度分布を示す。

図 26A 及び図 26B は第 2 実施例における投影光学系の点像強度分布を示す。

25 図 27 はマイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の手法のフローチャートである。

図 28 はマイクロデバイスとしての液晶表示素子を得る際の手法のフローチャ



ートである。

発明を実施するための最良の形態

以下、図面を参照して、本発明の第1実施例による投影光学系の製造方法について説明する。本実施例による投影光学系の製造方法の詳細を説明する前に、理解を容易とするために、その概略について図1を参照して簡単に説明する。図1は、本発明の第1実施例による投影光学系の製造方法の概略を示すフローチャートである。

図1に示すように、本実施例の投影光学系の製造方法は、設計工程S1、結晶材料準備工程S2、結晶軸測定工程S3、屈折部材形成工程S4、及び組上工程S5を有する。

設計工程S1では、光線追跡ソフトを用いて投影光学系の設計を行う際に、複数の偏光成分の光線を用いて投影光学系の光線追跡を行い、それぞれの偏光成分のもとでの収差、好ましくは偏光成分毎の波面収差を算出する。そして複数の偏光成分毎の収差及び複数の偏光成分収差の合成のスカラー成分であるスカラー収差に関して投影光学系の評価を行いつつ、投影光学系を構成する複数の光学部材（屈折部材、反射部材、回折部材等々）のパラメータを最適化して、これらのパラメータからなる設計データを得る。このパラメータとしては、光学部材の面形状、光学部材の面間隔、光学部材の屈折率等の従来のパラメータに加えて、光学部材が結晶材料である場合にはその結晶軸方位をパラメータとして用いる。

結晶材料準備工程S2では、投影光学系が使用される波長に対して光透過性を有する等軸晶系（結晶軸の単位長さが互いに等しく、それぞれの結晶軸の交点における各結晶軸がなす角度が全て90°である晶系）の結晶材料を準備する。

結晶軸測定工程S3では、結晶材料準備工程で準備された結晶材料の結晶軸の測定を行う。このとき、例えばラウエ(Laue)測定を行い結晶軸の方位を直接的に測定する手法か、結晶材料の複屈折を測定し、既知の結晶軸方位と複屈折量との関係に基づいて、測定された複屈折から結晶軸方位を定める手法を適用するこ

とができる。

5 屈折部材形成工程 S 4 では、屈折部材が設計工程で得られたパラメータ（設計データ）を有するように、結晶準備工程で準備された結晶材料の加工（研磨）を行う。なお、本実施例では、結晶軸測定工程 S 3 と屈折部材形成工程 S 4 との順番はどちらが先でも良く、例えば屈折部材形成工程 S 4 を先に実施する場合には、屈折部材の形状に加工された結晶材料の結晶軸を測定すれば良く、結晶軸測定工程 S 3 を先に実施する場合には、屈折部材形成後に測定された結晶軸がわかるように、屈折部材、或いは当該屈折部材を保持する保持部材に結晶軸方位の情報を持たせれば良い。

10 組上工程 S 5 では、加工された屈折部材を、設計工程で得られた設計データに従って、投影光学系の鏡筒内に組み込む。このとき、等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材の結晶軸を、設計工程で得られた設計データ中の結晶軸方位となるように位置決めする。

15 以上、本発明の一実施例による投影光学系の製造方法の概略について説明したが、次にその詳細な手順について図 2 ～図 8 を参照して説明する。

図 2 は、設計工程 S 1 を概略的に示すフローチャートである。図 2 に示すように、設計工程 S 1 は、設計パラメータの初期値を入力するステップ S 1 1、設計パラメータに基づいて、複数の偏光成分のもとでの投影光学系の光学性能を評価するステップ S 1 2、当該ステップ S 1 2 で算出された光学性能が所定規格内であるか否かを判断するステップ S 1 3、及び当該ステップ S 1 3 で所定規格内でない場合に設計パラメータを変更するステップ S 1 4 を備えている。

25 本実施例において、設計パラメータとしては、投影光学系を構成する光学部材（レンズ、反射面等）の面形状、面間隔、偏芯量、光軸に対する傾き、光軸を中心とした方位角、屈折率、複屈折率分布、反射率、透過率、透過率分布、有効径、公差等や、これらの光学部材の表面に形成される薄膜の構造、すなわち薄膜の層数、各層の厚さ、各層の材料（必要であれば各層の吸収計数）などを用いること

ができる。

次に、図 3 及び図 4 を参照して、複数の偏光成分のもとでの投影光学系の光学性能を評価するステップ S 1 2 の詳細を説明する。ここで、図 3 は投影光学系の光学性能の評価点の一例を示す図であり、図 4 はステップ S 1 2 の詳細を説明するためのフローチャートである。

図 3 に示す通り、本実施例では、投影光学系 P L の第 2 面としての像面 W のける光軸 A x 上の評価点 W 0 と、像面 W における任意像高（例えば最周辺像高）の評価点 W i とを評価点とする。なお、像面 W における任意像高の評価点 W i の数は 1 つには限定されず、複数の任意像高の評価点を用いても良い。なお、評価点 W 0 に入射する結像光束は、投影光学系の第 1 面としての物体面 R 上の光軸 A x 上の点 R 0 からの光束に対応しており、評価点 W i に入射する結像光束は物体面 R 上の任意物体高の点 R i からの光束に対応している。

また、ステップ S 1 2 における複数の偏光成分としては、例えば投影光学系の光軸を法線とする面内において所定の X 方向に振動する X 偏光成分と、上記面内において X 方向と直交する Y 方向に振動する Y 偏光成分とを用いることができる。また、複数の偏光成分としては、上記光軸を法線とする面内において光軸を含む方向（放射方向 R）に振動する R 偏光成分と、当該 R 偏光成分と直交した振動方向を持つ  $\theta$  偏光成分（タンジェンシヤル方向  $\theta$  に振動方向を有する偏光成分）とを用いても良く、上記 X Y 偏光成分及び R  $\theta$  偏光成分の双方（つまり 4 つの偏光成分）を用いても良い。

そして、本実施例では、複数の偏光成分毎に、投影光学系 P L の射出瞳 P S における位相分布 W 0 ( $\rho, \theta$ ) (W i ( $\rho, \theta$ )) を求めるが、この分布は、位相分布を射出瞳 P S 上で極座標 ( $\rho, \theta$ ) で表したものである。ここで、 $\rho$  は射出瞳面 P S の半径を 1 に規格化した規格化瞳半径、 $\theta$  は射出瞳面 P S の中心、典型的には光軸を原点とした極座標の動径角である。

(ステップ S 1 2 1) ステップ S 1 2 1 では、コンピュータに、投影光学系 P

Lの設計パラメータが入力される。この設計パラメータは、当該ステップS 1 2  
1が図2のステップS 1 1の直後に実行される場合は、ステップS 1 1で入力さ  
れた設計パラメータの初期値となり、当該ステップS 1 2 1が図2のステップS  
1 4の後に実行される場合には、ステップS 1 4で変更された後の設計パラメー  
5タとなる。

なお、上記設計パラメータは、投影光学系P Lの物体側（レチクル面R側）か  
ら入れた各光線について光線追跡を行ってそれら各光線の物体面（ウエハ面W）  
における複素振幅を求める上で必要な情報である。

（ステップS 1 2 2） 次に、コンピュータは、光線追跡を行い、図2に示すよ  
10うな任意の評価対象像点 $X_i$ （例えば最周辺像高）に入射する結像光束の第1偏  
光方向位相分布 $WH_i(\rho, \theta)$ 及び第2偏光方向位相分布 $WV_i(\rho, \theta)$ と、  
光軸上の評価像点 $X_i$ に入射する結像光束の第1偏光方向位相分布 $WH_0(\rho,$   
 $\theta)$ 及び第2偏光方向位相分布 $WV_0(\rho, \theta)$ とを算出する。

なお、ここでいう「第1偏光方向」及び「第2偏光方向」は、射出瞳面P S上  
15で互いに直交する2つの偏光方向であって、例えば上記XY偏光方向、R $\theta$ 偏光  
方向、またはXY及びR $\theta$ 偏光方向の双方を適用できる。

本実施例において、これらの位相分布を算出する際に求めるべき複素振幅は、  
投影光学系P Lの射出瞳面P Sの端部についてだけでなく、射出瞳面P Sの全域  
についてであるので、図3に示すように、評価対象像点 $X_i$ に入射する結像光束  
20の光線追跡は、 $X_i$ 上の共役点 $R_i$ から射出する光束 $L_{fi}$ のうち、互いに異な  
る射出角度で射出して射出瞳面P Sの互いに異なる位置を通過するような各光線  
についてそれぞれ行われる（なお、光線追跡すべき光線の最大射出角度は、投影  
光学系P Lの像側開口数に応じたものとなる。）。

なお、本実施例においては、固有複屈折を有する等軸晶系の結晶材料からなる  
25光学部材に対して光線追跡を行っているが、このような光学部材における結晶軸  
に対する複屈折の分布については、2001年5月15日に開かれた157nmリソ

グラフィに関する第2国際シンポジウム(2nd International Symposium on 157nm Lithography)での米国NIST(National Institute of Standards and Technology)のジョン・H・バーネットら(John H. Burnett et al.)によって発表されている。

5       そして、このような光線追跡により光束 $L f i$ の投影光学系 $P L$ の射出瞳面 $P S$ における第1偏光方向の複素振幅分布、及び第2偏光方向の複素振幅分布が取得され、それら分布からそれぞれ第1偏光方向位相分布、及び第2偏光方向位相分布が求められ、それら分布を射出瞳面 $P S$ 上の極座標 $(\rho, \theta)$ で表したものを、それぞれ評価対象像点 $X i$ に入射する結像光束の第1偏光方向位相分布 $W H i(\rho, \theta)$ 、及び第2偏光方向位相分布 $W V i(\rho, \theta)$ とおく。なお、 $\rho$ は射出瞳面 $P S$ の半径を1に規格化した規格化瞳半径、 $\theta$ は射出瞳面 $P S$ の中心を原点とした極座標の動径角である。

15       また、中心像高 $X 0$ に入射する結像光束の光線追跡も、同様に、 $X 0$ の共役点 $R 0$ から射出する光束 $L f 0$ のうち、互いに異なる射出角度で射出して射出瞳面 $P S$ の互いに異なる位置を通過する各光線についてそれぞれ行われる。そして、光束 $L f i$ の第1偏光方向の複素振幅分布、及び第2方向の複素振幅分布が求められ、それら分布を射出瞳面 $P S$ 上の極座標 $(\rho, \theta)$ で表したものを、それぞれ中心像高 $X 0$ に入射する結像光束の第1方向位相分布 $W H 0(\rho, \theta)$ 、及び第2方向位相分布 $W V 0(\rho, \theta)$ とおく。

20       (ステップS123) 次に、コンピュータは、評価対象像点 $X i$ の平均位相分布 $W A i(\rho, \theta)$ と、中心像高 $X 0$ の平均位相分布 $W A 0(\rho, \theta)$ とを、次式(1)、(2)により求める。

$$(1) \quad W A i(\rho, \theta) = (W V i(\rho, \theta) + W H i(\rho, \theta)) / 2$$

$$(2) \quad W A 0(\rho, \theta) = (W V 0(\rho, \theta) + W H 0(\rho, \theta)) / 2$$

25       すなわち、平均位相分布 $W A i(\rho, \theta)$ は、 $W V i(\rho, \theta)$ と $W V 0(\rho, \theta)$ との座標を一致させて得た中間値の分布である。

そして、求めた平均位相分布  $W A_i(\rho, \theta)$ ,  $W A_0(\rho, \theta)$  それぞれの RMS 値  $w a_i$ ,  $w a_0$  を求める。これらの RMS 値は、投影光学系 PL の波面収差に相当する。

(ステップ S 1 2 4) また、コンピュータは、ステップ S 1 2 2 において求めた  $W V_i(\rho, \theta)$ ,  $W H_i(\rho, \theta)$ ,  $W V_0(\rho, \theta)$ ,  $W H_0(\rho, \theta)$  を参照して、評価対象像点  $X_i$  のリターデーション分布  $\delta W_i(\rho, \theta)$  と、光軸上の評価像点  $X_0$  のリターデーション分布  $\delta W_0(\rho, \theta)$  とを、次式 (3)、(4) により求める。

$$(3) \quad \delta W_i(\rho, \theta) = W V_i(\rho, \theta) - W H_i(\rho, \theta)$$

$$(4) \quad \delta W_0(\rho, \theta) = W V_0(\rho, \theta) - W H_0(\rho, \theta)$$

すなわち、リターデーション分布  $\delta W_i(\rho, \theta)$  は、 $W V_i(\rho, \theta)$  と  $W H_i(\rho, \theta)$  との座標を一致させて得た差分の分布であり、リターデーション分布  $\delta W_0(\rho, \theta)$  は、 $W V_0(\rho, \theta)$  と  $W H_0(\rho, \theta)$  との座標を一致させて得た差分の分布である。

さらに、求めたリターデーション分布  $\delta W_i(\rho, \theta)$ ,  $\delta W_0(\rho, \theta)$  それぞれの RMS 値  $\delta w_i$ ,  $\delta w_0$  を求める。

一般にリターデーションが大きいとパターン像のコントラストが低下するので、上記リターデーション分布  $\delta W_i(\rho, \theta)$  の RMS 値及びリターデーション分布  $\delta W_0(\rho, \theta)$  の RMS 値は、評価対象像点における像のコントラスト及び光軸上の評価像点における像のコントラストの悪さを示している。

(ステップ S 1 2 5) コンピュータは、ステップ S 1 2 4 において求めたリターデーション分布  $\delta W_0$  を参照して、その RMS 値  $\delta w_0$ , 及びその射出瞳面内平均値  $A[\delta W_0]$  を求め、次式 (5) により、PSF 値を求める。

$$(5) \quad \text{PSF} = 1 - \frac{4\pi^2 \times \delta w_0^2 + 2\pi^2 \times A[\delta W_0]^2}{2}$$

この PSF 値は、リターデーションによって生じる点像強度分布の最大値の概ね

の値に相当する。このPSF値が小さいほど点像強度分布が劣化していることを示す。

なお、本実施例では、以上取得した $w_{ai}$ 、 $w_{a0}$ のそれぞれに加えて、次の(a)、(b)、(c)、(d)のような評価指標を取得してもよい。

5 (a)  $WA_i(\rho, \theta)$  をツェルニケ展開してできる各項のRMS値、又は／及びそのツェルニケ展開して得られた複数の項をグループ化して得られる各項のRMS値。

(b)  $WA_0(\rho, \theta)$  をツェルニケ展開してできる各項のRMS値、又は／及びそのツェルニケ展開して得られた複数の項をグループ化して得られる各項のRMS値。

10 (c) 光軸上の評価像点 $X_0$ を基準とした評価対象像点 $X_i$ の平均位相分布 $\Delta WA_i(\rho, \theta)$  又は／及びこの平均位相分布 $\delta WA_i$ のRMS値。

(d)  $\Delta WA_i(\rho, \theta)$  をツェルニケ展開してできる各項のRMS値、又は／及びツェルニケ展開して得られた複数の項をグループ化して得られる各項のRMS値。

15 このようにステップS12で算出された光学性能（例えば平均位相分布、リターデーション分布、これらのRMS値、PSF値等々）に基づいて、ステップS13では算出された光学性能が所定の規格内であるか否かを判断する。ここで、規格内である場合には、設計データ（設計パラメータ）を出力し、設計工程S1  
20 が完了する。また、算出された光学製造が所定の規格内でない場合には、ステップS14へ移行する。

ステップS14では、投影光学系の設計パラメータの少なくとも一部を変更してステップS12へ移行する。本実施例では、算出される光学性能が所定の規格内となるまで、このループを繰り返す。

25 なお、設計パラメータの変更を行う際に、最初は、投影光学系を構成する光学部材（レンズ、反射面等）の面形状、面間隔、偏芯量、光軸に対する傾き、屈折

率、有効径、公差等といった非結晶材料からなる光学系が有するパラメータのみを変更して、投影光学系の光学性能のうちのスカラー成分の収差を補正し、その後、薄膜の構造、光学部材の複屈折率分布、光軸を中心とした方位角等のパラメータを変更して、スカラー成分及び偏光成分の収差を補正しても良い。

- 5       例えば、等軸晶系の結晶材料として蛍石（フッ化カルシウム、 $\text{CaF}_2$ ）を用いる場合を考えると、この蛍石では、結晶軸  $[111]$  又は該結晶軸  $[111]$  と等価な結晶軸を光軸とした屈折部材を形成することが従来から行われていたため、他の結晶軸を光軸にする場合に比べて屈折部材を形成する際のノウハウの蓄積が大きい。従って、例えば図5に示すように、投影光学系の設計を行う際に、  
10       投影光学系中の蛍石からなる光学部材の光軸を結晶軸  $[111]$  と一致させた状態で設計し、この蛍石からなる光学部材の設計パラメータとして、光軸を中心とした方位角  $\theta_z$  を採用することが一例として考えられる。

- 以上の通り、設計工程S1では、計算上において所定の規格内となる光学性能を有する投影光学系の設計データ（設計パラメータ：投影光学系を構成する光学  
15       部材（レンズ、反射面等）の面形状、面間隔、偏芯量、光軸に対する傾き、光軸を中心とした方位角、屈折率、複屈折率分布、反射率、透過率、透過率分布、有効径、公差等や、これらの光学部材の表面に形成される薄膜の構造、すなわち薄膜の層数、各層の厚さ、各層の材料（必要であれば各層の吸収計数）など）を得ることができる。

- 20       次に、結晶材料準備工程S2についての説明を図6のフローチャートを参照して行う。図6は、投影光学系が使用される波長に対して光透過性を有する等軸晶系の結晶材料を準備する結晶材料準備工程S2の詳細を示すフローチャートである。なお、このような等軸晶系の結晶材料としては、蛍石（フッ化カルシウム、 $\text{CaF}_2$ ）やフッ化バリウム（ $\text{BaF}_2$ ）が挙げられる。

- 25       以下の説明では、等軸晶系の結晶材料として蛍石を適用した場合を例にとって説明する。



(ステップS 2 1) ステップS 2 1では、粉末原料を脱酸素化反応させる前処理を行う。紫外域または真空紫外域で使用する蛍石単結晶をブリッジマン法により育成する場合には、人工合成の高純度原料を使用することが一般的である。さらに、原料のみを融解して結晶化すると白濁して失透する傾向を示すため、スカベンジャーを添加して加熱することにより、白濁を防止する処置を施している。

5      蛍石単結晶の前処理や育成において使用される代表的なスカベンジャーとしては、フッ化鉛 ( $PbF_2$ ) が挙げられる。なお、原料中に含有される不純物と化学反応し、これを取り除く作用をする添加物質のことを一般にスカベンジャーという。本実施例における前処理では、まず、高純度な粉末原料にスカベンジャーを添加

10      して良く混合させる。その後、スカベンジャーの融点以上で、蛍石の融点未満の温度まで加熱昇温させることにより脱酸素化反応を進める。

その後、そのまま室温まで降温して焼結体としても良いし、或いはさらに温度を上昇させて一旦原料を融解させた後、室温まで降温して多結晶体としても良い。以上のようにして脱酸素化がなされた焼結体や多結晶体を前処理品という。

15      (ステップS 2 2) 次に、ステップS 2 2では、この前処理品を用いてさらに結晶成長させることにより単結晶インゴットを得る。

結晶成長の方法には、融液の固化、溶液からの析出、気体からの析出、固体粒子の成長に大別できることが広く知られているが、本実施例においては垂直ブリッジマン法により結晶成長させる。

20      まず、前処理品を容器に収納し、垂直ブリッジマン装置 (結晶成長炉) の所定位置に設置する。その後、容器内に収納された前処理品を加熱して融解させる。前処理品の融点に到達した後は、所定時間を経過させた後に結晶化を開始する。融液のすべてが結晶化したら、室温まで徐冷してインゴットとして取り出す。

(ステップS 2 3) ステップS 2 3では、インゴットを切断して、後述の屈折部材形成工程S 4で得ようとする光学部材の大きさ・形状と同程度のディスク材

25      を得る。ここで、屈折部材形成工程S 4で得ようとする光学部材がレンズである

場合には、ディスク材の形状を薄い円柱形状とすることが好ましく、円柱形状のディスク材の口径と厚さとは、レンズの有効径（外径）及び光軸方向の厚さに合わせて定められることが望ましい。

5 (ステップS24) ステップS24では、蛍石単結晶インゴットより切り出されたディスク材に対してアニール処理を行う。これらのステップS21～S24を実行することにより、蛍石単結晶からなる結晶材料が得られる。

次に、結晶軸測定工程S3について説明する。結晶軸測定工程S3では、結晶材料準備工程S2で準備された結晶材料の結晶軸の測定を行う。このとき、結晶軸の方位を直接的に測定する第1の測定手法と、結晶材料の複屈折を測定して間  
10 接的に結晶軸方位を定める第2の測定手法とが考えられる。まず、結晶軸の方位を直接的に測定する第1の測定手法について説明する。

第1の測定手法は、X線結晶解析の手法を用いて、結晶材料の結晶構造、ひいては結晶軸を直接的に測定する。このような測定手法としては、例えばラウエ  
(Laue)法が知られている。以下、第1の測定手法としてラウエ法を適用した場合  
15 について図7を参照して簡単に説明する。図7は、ラウエカメラを概略的に示す図である。

図7に示す通り、ラウエ法による結晶軸測定を実現するためのラウエカメラは、X線源100と、このX線源100からのX線101を試料としての結晶材料103へ導くためのコリメータ102と、結晶材料103から回折される回折X線104により露光されるX線感光部材105とを備えている。ここで、図7では  
20 不図示ではあるが、X線感光部材105を貫通しているコリメータ102の内部には、対向する一対のスリットが設けられている。

第1の測定手法においては、まず、結晶材料準備工程S2で準備された結晶材料103にX線101を照射して、この結晶材料103から回折X線104を発生させる。そして、この回折X線104で、結晶材料103のX線入射側に配置  
25 されたX線フィルムやイメージングプレート等のX線感光部材105を露光し、

このX線感光部材105上に結晶構造に対応した模様（回折像）を形成する。この回折像（ラウエ図形）は、結晶材料が単結晶のときには斑点状となり、この斑点はラウエ斑点と呼ばれる。本実施例で用いている結晶材料は蛍石でありこの結晶構造は既知であるため、このラウエ斑点を解析することにより、結晶結晶軸方位が明らかになる。

5       なお、結晶軸を直接測定する第1の測定手法としては、ラウエ法に限定されず、結晶を回転又は振動させながらX線を照射する回転法又は振動法、ワイセンベルグ法、プリセクション法などの他のX線結晶解析の手法や、結晶材料の劈開性を利用した方法、結晶材料の塑性変形を与えることにより結晶材料表面に現れる特有の形状を持つ圧像（或いは打像）を観察する方法等の機械的な手法などを用いても良い。

10       次に、結晶材料の複屈折を測定して間接的に結晶軸方位を定める第2の測定手法について簡単に説明する。第2の測定手法では、まず結晶材料の結晶軸方位とその方位における複屈折量との対応づけを行う。このとき、上述の第1の測定手法を用いて結晶材料のサンプルの結晶軸方位を測定する。そして、結晶材料サ  
15       ンプルの複数の結晶軸毎に複屈折の測定を行う。

図8は、複屈折測定機の概略的な構成を示す図である。図8において、光源110からの光は、偏光子111により水平方向（X方向）から $\pi/4$ だけ傾いた振動面を有する直線偏光に変換される。そして、この直線偏光は、光弾性変調器  
20       112により位相変調を受けて、結晶材料サンプル113に照射される。すなわち、位相の変化する直線偏光が結晶材料サンプル113に入射する。結晶材料サンプル113を透過した光は検光子114に導かれ、水平方向（X方向）に振動面を有する偏光のみが検光子114を透過して光検出器115で検出される。

光弾性変調器112により発生する所定の位相遅れのときに、どれだけの光量が  
25       光検出器115で検出されるのかを、位相遅れの量を変えながら測定することにより、遅相軸の方向とその屈折率、及び進相軸における屈折率を求めることが

できる。

なお、試料に複屈折が存在する場合、屈折率の差により当該試料を通過する振動面（偏光面）が直交した2つの直線偏光の光の位相が変化する。すなわち一方の偏光に対して他方の偏光の位相が進んだり遅れたりすることになるが、位相が進む方の偏光方向を進相軸と呼び、位相が遅れる方の偏光方向を遅相軸と呼ぶ。

5 本実施例では、上記第1の測定手法により結晶軸方位が既知となった結晶材料サンプルの結晶軸毎の複屈折測定を行い、結晶材料の結晶軸方位とその方位における複屈折量との対応づけを行う。このとき、測定する結晶材料の結晶軸として[1 0 0], [1 1 0] 及び「1 1 1」という代表的な結晶軸の他に、[1 1 2], [2 1 0] 及び[2 1 1]などの結晶軸を用いても良い（なお、結晶軸[0 1 0], [0 0 1]は上記結晶軸[1 0 0]と等価な結晶軸であり、結晶軸[0 1 1], [1 0 1]は上記結晶軸[1 1 0]と等価な結晶軸である）。また、測定された結晶軸の中間の結晶軸に関しては、所定の補間演算式を用いて補間しても良い。

15 第2の手法が適用された結晶軸測定工程S3では、図8に示した複屈折測定機を用いて、結晶材料準備工程S2で準備された結晶材料の複屈折の測定を行う。そして、結晶軸方位と複屈折との対応関係が予め求められているため、この対応関係を用いて、測定された複屈折から結晶軸方位を算出する。

このように、第2の手法によれば、直接的に結晶軸方位を測定しなくとも結晶材料の結晶軸方位を求めることができる。

20 次に、屈折部材形成工程S4について説明する。屈折部材形成工程S4では、結晶材料準備工程S2で準備された結晶材料を加工して所定形状の光学部材（レンズ等）を形成する。このとき、結晶軸測定工程S3と屈折部材形成工程S4との順番はどちらが先でも良く、例えば、結晶軸測定工程S3の後に屈折部材形成工程S4を行う第1の部材形成手法、屈折部材形成工程S4の後に結晶軸測定工程S4を行う第2の部材形成手法、及び結晶軸測定工程S3と結晶軸測定工程S4とを同時に行う第3の部材形成手法が考えられる。

25

まず、第1の部材形成手法について説明する。第1の部材形成手法では、光学部材が設計工程S1で得られた結晶軸方位に関するパラメータを含む設計データとなるように、結晶材料準備工程S2で準備されたディスク材に対して、研削、研磨等の加工を行う。このとき、加工された光学部材にその光学部材の結晶軸方位がわかるように所定のマーク等を設ける。

具体的には、結晶材料準備工程S2において結晶軸方位が測定された結晶材料（典型的にはディスク材）から必要に応じて研削された材料を用いて、投影光学系を構成する屈折部材を製造する。すなわち、周知の研磨工程にしたがって、設計データ中の面形状、面間隔を目標として各レンズの表面を研磨加工して、所定形状のレンズ面を有する屈折部材を製造する。このとき、各レンズの面形状の誤差を干渉計で計測しながら研磨を繰り返し、各レンズの面形状を目標面形状（ベストフィット球面形状）に近づける。こうして、各レンズの面形状誤差が所定の範囲に入ると、各レンズの面形状の誤差を、例えば図9に示す精密な干渉計装置を用いて計測する。

図9に示す干渉計装置は、設計値が球面である球面レンズの面形状計測に好適なものである。図9では、制御系121に制御された干渉計ユニット122からの射出光が、フィゾーステージ123a上に支持されたフィゾーレンズ123に入射する。ここで、フィゾーレンズ123の参照面（フィゾー面）で反射された光は参照光となり、干渉計ユニット122へ戻る。なお、図9では、フィゾーレンズ123を単レンズで示しているが、実際のフィゾーレンズは複数のレンズ（レンズ群）で構成されている。一方、フィゾーレンズ123を透過した光は測定光となり、被検レンズ124の被検光学面に入射する。

被検レンズ124の被検光学面で反射された測定光は、フィゾーレンズ123を介して干渉計ユニット122へ戻る。こうして、干渉計ユニット122へ戻った参照光と測定光との位相ずれに基づいて、被検レンズ124の被検光学面の基準面に対する波面収差が、ひいては被検レンズ124の面形状の誤差（設計上の

ベストフィット球面からのずれ) が計測される。なお、球面レンズの面形状誤差の干渉計による計測に関する詳細については、たとえば特開平 7-12535 号、特開平 7-113609 号、特開平 10-154657 号公報などを参照することができる。また、非球面レンズの面形状誤差を干渉計を用いて計測する場合には、図 9 の干渉計装置において、フィゾーレンズ 113 に代えて、平面形状の参照面を有する参照部材と、該参照部材を透過する光を所定形状の非球面波に変換する非球面波形成部材とをフィゾーステージ 113 a 上に設ける。ここで、非球面波形成部材は、レンズ、ゾーンプレート、或いはそれらの組み合わせで構成され、参照部材からの平面波を、測定対象である被検光学面の面形状に対応した非球面波に変換するものである。なお、このような非球面レンズの計測方法に関しては、たとえば特開平 10-260020 号、特開平 10-260024 号、特開平 11-6784 号を参照することができる。

屈折部材形成工程 S 4 における第 1 の部材形成手法においては、計測された面形状が所定の範囲内になるまで、計測・研磨を繰り返す。

なお、近年では、レンズ等の光学部材を保持する際に、レンズにかかる応力を最小限にするために、レンズの周縁部に複数の隆起部（リッジ）を設けて、当該レンズを保持する保持部材（レンズセル）でこれら複数のリッジ部をキネマティックに保持することが提案されている（特開 2001-74991 号公報参照）。ここで、このような複数の隆起部が光学部材の結晶軸方位となるように加工することによっても、加工後の光学部材の結晶軸方位を示すことができる。また、上記の光学部材保持手法によれば、保持部材と光学部材の位置・姿勢との関係が一定となるため、この保持部材に光学部材の結晶軸方位を示す情報（マーク等）を設けても良い。

次に、第 2 の部材形成手法について説明する。第 2 の部材形成手法では、結晶材料準備工程 S 2 で準備されたディスク材に対して、研削、研磨等の加工を行う。このとき、設計工程 S 1 で得られた設計データのうち、面形状、面間隔、有効径

(外径)等のパラメータを用いて(結晶軸方位に関するパラメータは用いないで)加工を行う。なお、第2の部材形成手法においても、第1の部材形成手法と同様に、面形状が所定の範囲内となるまで、測定・研磨を繰り返す。そして、加工された光学部材の結晶軸方位を上述の第1の測定手法を用いて計測し、測定された結晶軸方位に関する情報を、例えばマーク等で加工された光学部材に設ける。

5

このように、本実施例では、レンズ等に加工された後においても結晶軸方位を定めることができる。

なお、第2の部材形成手法では、結晶材料から屈折部材を形成した後に結晶軸方位の測定を行ったが、この結晶軸方位の測定を屈折部材の形成を行っている途中に行っても良い(第3の部材形成手法)。

10

そして、組上工程S5では、加工された各光学部材の光軸方向の間隔、光軸垂直方向の位置、及び光軸周りの回転角(方位角)が設計工程S1で得られた設計パラメータ通りとなるように、各光学部材を位置決めし、投影光学系を組み上げる。

15

以上の通り、第1実施例に係る投影光学系の製造方法によれば、例えば蛍石やフッ化バリウム等の等軸晶系の結晶材料に起因する複屈折の影響を複数の偏光成分に関して評価しつつ、この等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材の結晶軸の組み込み角度を複屈折の影響が極小となるように定めることが可能であるため、良好な光学性能を確保できる。

20

上述の第1の実施例では、等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材の結晶軸方位を最適化して、投影光学系の収差を低減させたが、結晶軸方位の最適化のみでは、要求される光学性能を満足しない場合があり得る。次に、第2実施例として、等軸晶系の結晶材料からなる等軸晶系屈折部材が有する固有複屈折による光学性能の悪化を、非結晶屈折部材により補償する投影光学系の製造方法について説明する。本実施例による投影光学系の製造方法の詳細を説明する前に、理解を容易とするために、その概略について図10を参照して簡単に説明する。図10は、本

25

発明の第2実施例による投影光学系の製造方法の概略を示すフローチャートである。

図10に示すように、第2実施例の投影光学系の製造方法は、第1実施例の製造方法が有する設計工程S1、結晶材料準備工程S2、結晶軸測定工程S3、第1屈折部材形成工程S4、及び組上工程S5に加えて、非結晶材料準備工程S6、  
5 複屈折量測定工程S7、及び第2屈折部材形成工程S8を有する。なお、第1屈折部材形成工程S4は、第1実施例の屈折部材形成工程S4と同じ工程であるが、本実施例では第2屈折部材形成工程S8との混同を避けるため、屈折部材形成工程S4ではなく、第1屈折部材形成工程S4と称する。

10 以下、第1実施例に係る製造方法との相違点について説明する。

まず、設計工程S1では、最適化される投影光学系のパラメータとして、第1実施例における設計パラメータに加えて、例えば石英やフッ素がドーピングされた石英等の非結晶材料の複屈折量を用いる。

例えば、図11Aに示すように、投影光学系として、等軸晶系の結晶材料からなる複数の屈折部材11、12と、石英やフッ素がドーピングされた石英等の非結晶材料からなる屈折部材13とを備えた光学系を考える。  
15

ここで、等軸晶系の結晶材料、例えば蛍石からなる第1の屈折部材11及び第2の屈折部材12において、その結晶軸 $[111]$ を光軸Axと一致させて配置し、第1の屈折部材11に対して第2の屈折部材12を光軸Axを中心としてXY平面内で $60^\circ$ 回転させる。このとき、第1の屈折部材11による複屈折の影響を図11Bの(b)に示し、第2の屈折部材12による複屈折の影響を図11Bの(a)に示す。  
20

図11Bの(a)から(c)及び図11Cは、光線の入射角に対する複屈折率の分布を示しており、図中破線で示す6つの同心円が1目盛り $10^\circ$ を表している。  
25 従って、最も内側の円が光軸に対して入射角 $10^\circ$ の領域を、最も外側の円が光軸に対して入射角 $60^\circ$ の領域を表している。



また、黒丸は比較的大きな屈折率を有する複屈折のない領域を、白丸は比較的小さな屈折率を有する複屈折のない領域を表している。一方、太い円および太い両矢印は複屈折のある領域における比較的大きな屈折率の方向(遅相軸の方向)を、細い円および細い両矢印は複屈折のある領域における比較的小さな屈折率の方向(進相軸)を表している。

図11Bの(b)及び図11Bの(c)に示すように、第1及び第2の屈折部材11, 12において、光軸Axと一致している結晶軸 $[111]$ に対応する領域は、比較的小さな屈折率を有する複屈折のない領域となる。また、結晶軸 $[100]$ ,  $[010]$ ,  $[001]$ に対応する領域は、比較的大きな屈折率を有する複屈折のない領域となる。さらに、結晶軸 $[110]$ ,  $[101]$ ,  $[011]$ に対応する領域は、周方向の偏光に対する屈折率が比較的小さく径方向の偏光に対する屈折率が比較的大きい複屈折領域となる。このように、各々の屈折部材11, 12では、光軸Axから $35.26^\circ$  (結晶軸 $[111]$ と結晶軸 $[110]$ とのなす角度)の領域において、複屈折の影響を最大に受けることがわかる。

図11Bの(c)は、光軸を中心とした相対回転角 $60^\circ$ を示す第1及び第2の屈折部材11, 12による複屈折の影響を合成したものである。図11Bの(c)から明らかな通り、これら第1及び第2の屈折部材11, 12全体では、複屈折が最大である結晶軸 $[110]$ ,  $[101]$ ,  $[011]$ の影響が薄められることがわかる。しかしながら、光軸から $35.26^\circ$ の領域すなわち光軸から比較的近い領域において、径方向の偏光に対する屈折率よりも周方向の偏光に対する屈折率が小さい複屈折領域が残ることになる。すなわち、等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材の結晶軸の角度を調整する手法では、結晶軸の角度によっては複屈折の影響をある程度受ける場合もあり、十分に良好な結像性能(光学性能)を確保することが困難となる恐れがある。

そこで、本実施例では、等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材11, 12とは異なる非結晶材料からなる屈折部材13に、屈折部材11, 12による複屈折を

キャンセルする複屈折分布を与える。この屈折部材 1 3 の複屈折分布を図 1 1 (e) に示す。なお、非結晶材料からなる屈折部材に所望の複屈折分布を与える手法については、後述の非結晶材料準備工程 S 6 において説明する。

5 当該設計工程 S 1 では、このような非結晶材料からなる屈折部材の複屈折分布を算出する。具体的には、第 1 実施例の設計工程 S 1 における設計パラメータ（設計データ）に、屈折部材の複屈折分布のパラメータを追加し、第 1 実施例のように、ステップ S 1 1 ~ S 1 4 を実行する。

10 なお、本実施例においては、非結晶材料からなる屈折部材の複屈折分布のパラメータ以外のパラメータ（第 1 実施例のパラメータと同じパラメータ）を最適化し、この最適化されたパラメータにより算出される収差の残渣分を、非結晶材料からなる屈折部材の複屈折分布のパラメータの最適化を行うことにより補正する手法を用いることもできる。

15 また、第 1 実施例と同様に、最初に投影光学系を構成する光学部材（レンズ、反射面等）の面形状、面間隔、偏芯量、光軸に対する傾き、屈折率、有効径、公差等といった非結晶材料からなる光学系が有するパラメータのみを変更して、投影光学系の光学性能のうちのスカラー成分の収差を補正し、その後、薄膜の構造、光学部材の複屈折率分布、光軸を中心とした方位角等のパラメータを変更して、スカラー成分及び偏光成分の収差を補正しても良い。

20 なお、等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材の結晶軸方位を最適化した結果、偏光収差だけではなく、スカラー収差も残存する場合には、投影光学系を構成する光学部材のうちの一部の光学部材の光学面（レンズ面、反射面）に、このスカラー収差を補正するための非球面を形成しても良い。この非球面としては、後述の組上工程 S 5 におけるステップ S 5 2 6 で算出される残収差補正用の非球面（典型的には光軸に関して回転非対称な形状）と兼用させても良いし、別に設けても良い。別に設ける場合には、当該設計工程 S 1 においてその非球面形状（光

25 軸に関して回転対称又は回転非対称な形状）を設計パラメータとしておく。

次に、非結晶材料準備工程 S 6 について説明する。本実施例では、非結晶材料として石英又はフッ素がドーブされた石英（以下、改質石英と称する）を用いるが、このような石英又は改質石英は、光学結晶とは異なり、理想的な状態では複屈折性が発生しない。

5        しかしながら、石英又は改質石英では、不純物が混入した場合や、高温で形成された石英を冷却する際に温度分布が生じた場合には、内部応力による複屈折性が現れる。そこで、本実施例では、インゴットに混入させる不純物の量や種類、または熱履歴を調整することにより、石英又は改質石英に所望の複屈折分布を発生させる。

10        なお、不純物としては、OH、Cl、金属不純物、溶存ガスが挙げられ、ダイレクト法 (Direct Method) の場合は、数百 ppm 以上含有される OH、次いで数十 ppm 含有される Cl が混入量から支配的であると考えられる。この不純物がインゴットに混入した場合には材料の熱膨張率が変化するので、例えばアニール後に冷却する場合には、不純物が混入した部分の縮み方が大きくなり、この縮み方の差による内部応力が発生し、応力複屈折が生じる。

15        また、熱履歴に関しては、上記ダイレクト法、VAD (vapor axial deposition) 法、ゾルゲル (sol-gel) 法、プラズマバーナ (plasma burner) 法などの製造方法によらずに存在する。

20        本実施例では、石英の原料となる Si 化合物ガス (Si 化合物ガスを送り出すために O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub> 等のキャリアガスが用いられる) と、加熱のための燃焼ガス (O<sub>2</sub> ガスと H<sub>2</sub> ガス) とをバーナーから流出し、火炎内で石英を堆積させる火炎加水分解法を用いて石英の合成を行いインゴットを得る。その後、インゴットを切り出してディスク材を得て、このディスク材のアニール (又は徐冷) を行う。そして、本実施例では、石英からなる屈折部材の複屈折分布が設計工程 S 1 により算出された複屈折分布となるように、石英の合成時の合成条件と、アニール時の熱履歴条件とを調整している。このとき、合成条件のパラメータとしては、バー

ナー構造、ガス流量、排気流量、ターゲットの揺動パターン等が挙げられる。なお、このような合成条件やアニール条件は、試行錯誤的に求めても良いし、経験則を用いて決定しても良い。

5       なお、本実施例では、例えば石英又は改質石英からなる非結晶材料の複屈折分布の対称軸と、当該非結晶材料から形成される屈折部材の光軸とをほぼ一致させている。このために、石英の合成時においてインゴットを回転させながら合成してインゴット中の不純物濃度および物性分布を中心対称とする。このインゴットの中心位置（合成時の回転中心とほぼ一致）が応力分布の中心となるため、後述の第2の屈折部材形成工程では、この中心位置を基準として（中心位置と光軸とを一致させて）屈折部材を形成することが好ましい。このため、インゴットから  
10       切り出した素材には、その中心位置をマーキングしておくことが望ましい。

そして、アニール時には、インゴットから切り出した素材形状を円筒形のディスク材とし、中心対称な温度分布を有する炉の中央で加熱している。このとき、ディスク材を回転させつつアニールを行うことが好ましい。

15       次に、複屈折量測定工程S7について説明する。この複屈折量測定工程S7では、非結晶材料準備工程S6により得られた石英又は改質石英からなる非結晶材料の複屈折分布の測定を行う。この複屈折分布の測定においては、図8に示した複屈折測定機を用いることができ、複屈折分布の測定方法も前述した通りであるため、ここでは説明を省略する。なお、この測定によって得られる複屈折分布の  
20       対称軸の位置に関する情報を、例えばディスク材にマーキングする等の手法によって、非結晶材料に持たせておくことが好ましい。

また、この複屈折量測定工程において、非結晶材料の屈折率分布も測定しておくことが好ましい。以下、図12を参照して、非結晶材料の屈折率の絶対値及び屈折率分布を測定する手法について説明する。図12は、屈折率の絶対値及び屈  
25       折率分布を測定するための干渉計装置を概略的に示す図である。

図12において、オイル131が充填された試料ケース132の中の所定位置

に被検物体である非結晶材料 1 3 3 を設置する。そして、制御系 1 3 4 に制御された干渉計ユニット 1 3 5 からの射出光が、フィゾーステージ 1 3 6 a 上に支持されたフィゾーフラット（フィゾー平面） 1 3 6 に入射する。

5       ここで、フィゾーフラット 1 3 6 で反射された光は参照光となり、干渉計ユニット 1 3 5 へ戻る。一方、フィゾーフラット 1 3 6 を透過した光は測定光となり、試料ケース 1 3 2 内の被検物体 1 3 3 に入射する。被検物体 1 3 3 を透過した光は、反射平面 1 3 7 によって反射され、被検物体 1 3 3 及びフィゾーフラット 1 3 6 を介して干渉計ユニット 1 3 5 へ戻る。こうして、干渉計ユニット 1 3 5 へ戻った参照光と測定光との位相ずれに基づいて、非結晶光学部材 1 3 3 の屈折率  
10       分布による波面収差が計測される。なお、屈折率均質性の干渉計による計測に関する詳細については、例えば特開平 8 - 5 5 0 5 号公報などを参照することができる。

次に、非結晶材料から屈折部材を形成する第 2 屈折部材形成工程 S 8 について説明する。

15       第 2 屈折部材形成工程 S 8 では、複屈折量計測工程 S 7 において複屈折分布や屈折率分布等が計測された非結晶材料（典型的にはディスク材）から必要に応じて研削された材料を用いて、投影光学系を構成すべき各レンズを製造する。すなわち、周知の研磨工程にしたがって、設計データ中の面形状、面間隔を目標として各レンズの表面を研磨加工して、所定形状のレンズ面を有する屈折部材を製造  
20       する。この第 2 屈折部材形成工程においても、第 1 屈折部材形成工程（第 1 実施例の屈折部材形成工程 S 4）と同様に、各レンズの面形状の誤差を干渉計で計測しながら研磨を繰り返し、各レンズの面形状を目標面形状（ベストフィット球面形状）に近づける。こうして、各レンズの面形状誤差が所定の範囲に入ると、各レンズの面形状の誤差を、第 1 屈折部材形成工程（第 1 実施例の屈折部材形成工  
25       程 S 4）と同様に、例えば図 9 に示した精密な干渉計装置を用いて計測する。第 2 屈折部材形成工程 S 8 においても、計測された面形状が所定の範囲内になるま

で、計測・研磨を繰り返す。

次に、図 1 3 を参照して、第 2 実施例における組上工程 S 5 について説明する。

図 1 3 は、第 2 実施例に係る投影光学系の製造方法の組上工程 S 5 の詳細を示す  
フローチャートである。なお、フローチャートでは判断工程をひし形で図示する  
5 のが一般的ではあるが、図 1 3 においては、図示の都合上、判断工程（たとえば  
図 1 3 の S 5 1 4、S 5 1 7、S 5 2 2、S 5 2 3、S 5 3 2）を図示のごとく  
六角形で表している。

（ステップ S 5 1 0） ステップ S 5 1 0 では、結晶軸測定工程 S 3 で測定さ  
れた結晶材料からなる屈折部材の結晶軸に関する情報と、第 1 屈折部材形成工程  
10 S 4 で測定された加工後の屈折部材の面形状及び面間隔に関する情報と、複屈折  
量測定工程 S 7 で測定された非結晶材料からなる屈折部材の屈折率及び分布並び  
に複屈折量及び分布に関する情報と、第 2 屈折部材形成工程 S 8 で測定された加  
工後の屈折部材の面形状及び面間隔に関する情報とに基づいて、これらのパラメ  
ータ（面形状、面間隔、屈折率、屈折率分布、結晶軸方位、複屈折量、複屈折分  
15 布等）を有する光学部材を用いて投影光学系を組み立てた際の光学性能を、コン  
ピュータを用いたシミュレーションによって予測する。

具体的には、まず、設計工程 S 1 で得られた設計データ通りに投影光学系の各  
光学部材のパラメータを設定した上で、上記情報を各光学部材に加味した投影光  
学系の光学性能を算出する。ここで、投影光学系の光学性能の評価値としては、  
20 前述の平均位相分布、リターデーション分布、これらの RMS 値、P S F 値等を  
用いることができる。

（ステップ S 5 1 1） ステップ S 5 1 1 では、シミュレーションにて仮想的に  
組み立てられた各光学部材の間隔、光軸に対する偏心量、光軸周りの方位角（組  
み込み角度）を変化させたときの投影光学系 P L の光学性能をシミュレーション  
25 で求める。上述の工程 S 2 ～ S 4、及び S 6 ～ S 8 を経て製造された光学部材に  
は屈折率分布や複屈折分布の不均質や、面形状、面間隔、及び結晶軸方位等の製

造誤差が生じているため、光学部材の光軸周りの方位角（組み込み角度）のみを変えた場合でも投影光学系P Lの特性は変化する。ここでは、最も光学特性が良くなるよう各光学部材の間隔及び偏心量と組み込み角度とを最適化する。

5 (ステップS 5 1 2) ステップS 5 1 2では、シミュレーションにより最適化された光学部材の間隔及び偏心量と組み込み角度とに基づいて、最適化された光学部材の間隔、偏心量、及び組み込み角度通りに光学部材を、各光学部材を保持する鏡筒に組み込む。(ステップS 5 1 3) ステップS 5 1 3では、図1 4に示した収差測定装置を用いて波面収差を計測する。図1 4に示した収差測定装置は、位相回復法の原理を用いるものである。図1 4において、投影光学系P L  
10 の物体面にパターン板1 4 1のパターン形成面を位置決めするとともに、投影光学系P Lの結像位置（像面）に対物光学系系1 4 3の前側焦点位置を位置決めする。その後、照明光源1 4 0から射出される照明光によりパターン板1 4 1に形成されたピンホール1 4 2を照明して理想的な球面波を発生させる。この理想的な球面波が投影光学系P Lを通過すると、投影光学系P Lに残存する収差の影響  
15 を受けて理想的な球面の波面形状が変化する。投影光学系P Lを通過した光を対物光学系1 4 3で集光し、その像を撮像素子1 4 4で撮像して得られた撮像信号は、投影光学系P Lの残存収差に応じて強度分布が変化する。よって、投影光学系P Lの残存収差に関する情報を含む画像信号を、位相回復法に基づく所定の演算を行うことにより、投影光学系P Lの残存収差を求めることができる。尚、  
20 上述した位相回復法の詳細な内容については、米国特許第4, 3 0 9, 6 0 2号明細書等を参照されたい。

なお、投影光学系P Lの残存収差を計測するためには、図1 4に示したように、パターン板1 4 1に形成されたピンホール1 4 2が投影光学系P Lの光軸A X上に配置している場合のみならず、光軸A Xに直交する面内の複数の計測点（例えば、数十点）にピンホール1 4 2を配置した状態で波面収差を測定する必要がある。  
25 そこで、この工程では、光軸A Xに直交する面内においてピンホール1 4 2

の位置を計測点に移動させつつ波面収差を測定する。尚、パターン板 1 4 1 を移動させるのではなく、パターン板 1 4 1 に複数のピンホールを形成し、照明光源 1 4 0 内に照明領域を規定する部材を設け、一度に 1 つのピンホールを照明することにより波面収差を計測するようにしても良い。

5 (ステップ S 5 1 4) ステップ S 5 1 4 では、投影光学系の像面上の全ての測定点において波面収差が測定可能か否かを判断する。図 1 4 に示した収差測定装置は、撮像素子 1 4 4 で撮像して得られた撮像信号に対して位相回復法に基づく所定の演算を行うことにより、投影光学系 P L の残収差を求めているが、位相回復法では投影光学系 P L の残収差が大きすぎると波面を復元することができない。よって、当該ステップ S 5 1 4 において、全ての測定点において波面収差  
10 が測定可能か否かが判断される。収差測定が不可能な計測点が 1 つでもあると判断された場合（判断結果が「NG」）の場合には、ステップ S 5 1 5 へ移行する。

(ステップ S 5 1 5) ステップ S 5 1 5 では、各光学部材の光軸方向の間隔の調整、各光学部材の光軸直交面内の位置の調整（偏心調整）、及び各光学部材の光  
15 軸周りの方位角の調整のうちの少なくとも 1 つを実行することにより、投影光学系の光学性能を調整を行い、ステップ S 5 1 3 へ移行する。

ステップ S 5 1 4 において全ての計測点で収差測定が可能であると判断されるまで、これらのステップ S 5 1 3 ～ S 5 1 5 を繰り返し実行する。ここで、ステップ S 5 1 4 において全ての計測点で収差測定が可能であると判断された場合  
20 (判断結果が「OK」の場合) には、ステップ S 5 1 6 へ移行する。

(ステップ S 5 1 6) ステップ S 5 1 6 では、上記収差測定装置を用いて全計測点における波面収差を計測する。

(ステップ S 5 1 7) ステップ S 5 1 7 では、ステップ S 5 1 6 で計測された波面収差が所定の規格内であるか否かを判断する。このステップ S 5 1 7 は、後  
25 述の高精度な収差測定ができる程度に投影光学系の光学性能が調整されているか否かを判断する工程である。この判断結果が「NG」の場合には、ステップ S 5



18へ移行し、判断結果が「OK」の場合には、ステップS519へ移行する。

(ステップS518) ステップS518では、各光学部材の光軸方向の間隔の調整、各光学部材の光軸直交面内の位置の調整(偏心調整)、及び各光学部材の光軸周りの方位角の調整のうちの少なくとも1つを実行することにより、投影光学系の光学性能を調整を行い、ステップS516へ移行する。

(ステップS519) 上述のステップS516～S518を繰り返し実行することにより、投影光学系の光学性能が、高精度な収差測定を行うことができる程度にまで調整されると、当該ステップS519へ移行する。

このステップS519では、例えば特開平10-38757号公報に開示されたフィゾー干渉計方式の波面収差測定機や、特開2000-97616号公報に開示されたPDI (Phase Diffraction Interferometer: 位相回折干渉計) 方式の波面収差測定機を用いて、高精度な波面収差計測を行う。

このとき、本実施例では、投影光学系に対して複数の偏光成分毎に波面収差の測定を行う、具体的には、上述のXY偏光成分やRθ偏光成分等を用いることができる。なお、本実施例では、複数の偏光成分毎の波面収差の測定に代えて、或いは加えて、非偏光成分(例えば上記XY偏光成分、Rθ偏光成分を同時に用いる)を用いた測定を行っても良い。

(ステップS520) ステップS520では、測定された波面収差に対してツェルニケの円筒関数系 $Z_n(\rho, \theta)$ をフィッティングして各項毎の展開係数を求め、波面収差の各成分を(必要であれば偏光毎の波面収差の各成分も)算出する。

ここで、ツェルニケの円筒関数系 $Z_n(\rho, \theta)$ を用いた波面収差のフィッティングについて簡単に説明する。

まず、射出面上の極座標を定め、波面収差を、 $W(\rho, \theta)$ として表す。ここで、 $\rho$ は射出瞳半径を1に規格化した規格化瞳半径であり、 $\theta$ は極座標の動径角である。次いで、波面収差 $W(\rho, \theta)$ を、ツェルニケの円筒関数系 $Z_n(\rho,$

$\theta$ ) を用いて、次の (6) 式に示すように展開する。

$$(6) \quad W(\rho, \theta) = \sum C_n Z_n(\rho, \theta) = C_1 Z_1(\rho, \theta) + C_2 Z_2(\rho, \theta) + \dots + C_n Z_n(\rho, \theta)$$

なお、ツェルニケの円筒関数系  $Z_n(\rho, \theta)$  の各項に

5 係る円筒関数系については周知であるので、詳細な説明は省略する。

さて、本実施例にかかる投影光学系には、投影光学系を露光装置本体に搭載した後でも光学性能（倍率、収差等）を調整するための外部調整機構が設けられている。このような外部調整機構としては、投影光学系を構成する光学部材の位置・姿勢をアクチュエータで制御する、或いは手動で調整する機構や、投影光学系を構成する光学部材のうち、最も第1面側及び／又は第2面側に位置する光学部材を、当該光学部材とは異なる光学特性を有する光学部材と交換する機構などがある。

10

以下、図15を参照して、外部調整機構について簡単に説明する。本実施例の投影光学系は、複数の光学部材21～27を光軸方向（Z方向）に沿って配置した構成となっているが、最も第1面R側の光学部材21と最も第2面W側の光学部材22とが投影光学系PLの本体に対して交換可能となっている。また、複数の光学部材のうちの5つのレンズ23～27は、それぞれアクチュエータ28～32によって、光軸方向（Z方向）、及び当該光軸と直交する方向（XY方向）を軸とした回転方向（ $\theta_x$ ,  $\theta_y$ 方向）に沿った位置が調整可能となっている。ここで、最も第2面W側の光学部材22を保持する保持部材33は、投影光学系PLを構成する鏡筒の一部34に対し脱着可能に構成されている。

15

20

本実施例では、5つのレンズがそれぞれZ方向、 $\theta_x$ 方向、及び $\theta_y$ 方向に位置調整可能となっているため、5つの回転対称収差（倍率、低次のディストーション、低次のコマ収差、低次の像面湾曲及び低次の球面収差）及び5つの偏心収差（2種類の偏心ディストーション、偏心コマ収差、偏心アス、及び偏心球面収差）を補正することができる。なお、本実施例では5つのレンズを位置調整可能

25

としたが、位置調整可能なレンズの数は5つには限定されない。

また、本実施例では、最も第1面R側の光学部材及び最も第2面W側の光学部材のうちの少なくとも一方を、当該光学部材とは異なる複屈折量及び複屈折分布を有する光学部材と交換可能としている。ここで、当該光学部材としては、上述  
5 の結晶材料準備工程S2、結晶軸測定工程S3及び第1屈折部材形成工程S4と同様の製造方法により製造される等軸晶系の結晶材料（例えば蛍石、フッ化バリウム）や、上述の非結晶材料準備工程S6、複屈折量測定工程S7及び第2屈折部材形成工程S8と同様の製造方法により製造される非結晶材料（石英、改質石英）を適用することができる。

10 また、最も第1面R側の光学部材及び／又は最も第2面W側の光学部材に関しては、投影光学系PLに対して、そのXY平面内の位置、 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 方向の傾き、Z方向の位置が調整可能となるようにすることが好ましい。この構成によれば、例えば回転非対称な偏光収差が投影光学系PLに発生している場合には、所定の複屈折分布を有する光学部材21または22の位置・姿勢を調整して、回転非対  
15 称な偏光収差を補正できる。ここで、最も第2面W側の光学部材が平行平板である場合には、この $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 方向の傾きを調整することにより偏心コマ収差を補正できる。また、最も第2面W側の光学部材の屈折力を変更するように調整すれば（屈折力が異なる光学部材と交換すれば）、投影光学系PLのペッツバル和を調整することができる。

20 また、図15には示していないが、投影光学系PLを構成する光学部材の一部にトーリック面形状の光学面（屈折面、反射面等）を設けて、当該光学部材の光軸Ax周りの方位角を調整することにより、光軸上非点隔差を補正することが可能である。

（ステップS521） 図13に戻って、ステップS521では、投影光学系が  
25 ステップS520で算出された波面収差の各成分の値を有している場合に、上記外部調整機構を用いて調整した後の波面収差（又は波面収差の各成分）をシミュ

レーションで予測する。具体的には、算出された波面収差の各成分の値を出発点とし、外部調整機構のパラメータ（レンズ23～27の移動量、光学部材21及び／又は22の面形状、厚み、屈折率、屈折率分布、複屈折量、複屈折分布）を最適化し、最適化された後のシミュレーション上での投影光学系の収差を求める。

5       なお、外部調整機構において、複屈折量及び分布の異なる光学部材を交換しない場合には、予測する波面収差はスカラー成分のみとして良い。

（ステップS522）   ステップS522では、シミュレーションにより予測された収差が所定の規格内であるか否かを判断する。このステップS522の判断結果が「NG」の場合には、ステップS523へ移行する。また、このステップ  
10       S522の判断結果が「OK」の場合には、ステップS529へ移行する。

（ステップS523）   ステップS523では、ステップS522において予測された収差を、各光学部材の光軸方向の間隔の調整、各光学部材の光軸直交面内の位置の調整（偏心調整）、及び各光学部材の光軸周りの方位角の調整を行うことによって補正できるか否かを判断する。ここで、当該ステップS523の判断結果が「OK」の場合には、ステップS524へ移行し、判断結果が「NG」の場合  
15       には、ステップS525へ移行する。

（ステップS524）   ステップS524では、各光学部材の光軸方向の間隔の調整、各光学部材の光軸直交面内の位置の調整（偏心調整）、及び各光学部材の光軸周りの方位角の調整のうちの少なくとも1つを調整して、投影光学系の収差を修正し、ステップS516の波面収差計測へ移行する。  
20

これらのステップS516～S524は、投影光学系の光学部材に非球面を形成したり、異なる複屈折分布の光学部材に交換することなく、どこまで投影光学系の光学性能を追い込めるかを求める工程である。

なお、上記ステップS523において、光学部材の間隔調整、偏心調整及び方位角調整のみでは、規格外と判断された収差の修正が不可能であると判断された場合には、以下のステップS525へ移行する。  
25

(ステップS 5 2 5) ステップS 5 2 5では、各光学部材の光軸方向の間隔の調整、各光学部材の光軸直交面内の位置の調整(偏心調整)、及び各光学部材の光軸周りの方位角の調整を行った後の波面収差(又は波面収差の各成分、必要であれば偏光毎の波面収差の各成分)をシミュレーションで予測する。

- 5        具体的には、算出された波面収差の各成分の値を出発点とし、各光学部材の間隔調整量、偏心調整量、及び方位角調整量をパラメータとして最適化し、最適化された後の投影光学系の収差を求める。

- 10        (ステップS 5 2 6) ステップS 5 2 6では、ステップS 5 2 5で予測された投影光学系の残留収差(収差の残渣成分)を補正することができる非球面形状及び／又は複屈折分布を算出する。この工程S 5 2 6では、補正する収差に応じて非球面を形成する光学部材及び／又は複屈折分布を変更する光学部材が選択される。

- 15        図1 6 A、図1 6 B及び図1 6 Cは、非球面が形成される光学部材及び／又は複屈折分布が変更される光学部材を説明するための図である。図1 6 Aに示した投影光学系P Lは、図示を簡略化しており、第1面R側から順に、負の屈折力を有する光学部材e 1、正の屈折力を有する光学部材e 2、負の屈折力を有する光学部材e 3、開口絞りA S、及び正の屈折力を有する光学部材e 4を有している。

- 20        第1面R上の2つの異なる物点Q 1、Q 2からの光が投影光学系P Lを通過する際の光路について考える。図中符号L 1は物点Q 1から射出される光束の光路であり、符号L 2は物点Q 2から射出される光束の光路である。投影光学系P Lの光軸A xと第1面Rとの交点に位置する物点Q 1からの光は、光学部材e 1～e 4を通過する度に発散又は集束されて、光軸A xと第2面Wとの交点に結像する。ここで、光学部材e 1～e 4の有効径を $\phi 1 \sim \phi 4$ とする。また、各光学部材e 1～e 4を通過する際の光束L 1の光束径を $\phi L11 \sim \phi L14$ とし、各光学部材e 1～e 5を通過する際の光束L 2の光束径を $\phi L21 \sim \phi L24$ とする。
- 25

光束L 1、L 2が光学部材e 1を通過する際の光路を考えると、光学部材

e 1 の有効径  $\phi 1$  に対する光束径  $\phi L11$  の比及び光学部材 e 1 の有効径  $\phi 1$  に対する光束径  $\phi L21$  の比は約 0.25 程度であり、しかも、光束 L 1 が光学部材 e 1 を通過する位置と光束 L 2 が光学部材 e 1 を通過する位置とは異なる。次に、光束 L 1, L 2 が光学部材 e 4 を通過する際の光路を考えてみると、光学部材 e 4 の有効径  $\phi 4$  に対する光束径  $\phi L15$  の比及び光学部材 e 4 の有効径  $\phi 4$  に対する光束径  $\phi L24$  の比は、ほぼ 1 に近い値となる。しかも、光束 L 1 が光学部材 e 4 を通過する位置と光束 L 2 が光学部材 e 4 を通過する位置とはほぼ同一である。よって、ステップ S 5 2 6 において投影光学系 P L 内の光学部材の非球面を算出する際、及び投影光学系 P L 内の光学部材の複屈折量及び分布を算出する際には、  
10 図 1 6 A を用いて説明した光束の通過経路を考慮して有効に収差を補正することができる光学部材を選択する必要がある。

例えば像面座標依存性の高い収差（ディストーション、像面湾曲等のスカラー収差、像面座標に応じて異なる偏光収差（複屈折の影響））を補正する場合には、物点 Q 1 からの光束 L 1 と物点 Q 2 からの光束 L 2 とが分離した位置を通過する  
15 光学部材 e 1 の光学面（レンズ面、反射面等）に非球面を設ける、或いは光学部材 e 1 の複屈折分布を変更すると、像面座標依存性の高い収差を効果的に補正することができる。

また、瞳座標依存性の高い収差（例えば球面収差、偏心コマ収差等のスカラー収差、像面座標依存性の少ない偏光収差（複屈折の影響））を補正する場合には、  
20 物点 Q 1 からの光束 L 1 及び物点 Q 2 からの光束 L 2 がほぼ全面を通過する光学部材 e 4 の光学面に非球面を設ける、或いは光学部材 e 4 の複屈折分布を変更すると、瞳座標依存性の高い収差を効果的に補正することができる。

なお、像面座標依存性及び瞳座標依存性が同等に近い収差（例えばコマ収差等）に関しては、物点 Q 1 からの光束 L 1 及び物点 Q 2 からの光束 L 2 の重畳の程度  
25 が中間的となる光学部材（例えば光学部材 e 2 等）の光学面に非球面を設ける、或いは物点 Q 1 からの光束 L 1 及び物点 Q 2 からの光束 L 2 の重畳の程度が中間

的となる光学部材（例えば光学部材 e 2 等）の複屈折分布を変更すれば、像面座標依存性及び瞳座標依存性が同等に近い収差を効果的に補正することができる。

5 従って、ステップ S 5 2 6 では、スカラー収差を補正するために、投影光学系 P L 中の複数の光学部材 e 1 ～ e 4 のうちの少なくとも 3 つの光学部材の光学面に関して非球面形状を算出することが好ましい。なお、偏光収差（複屈折の影響）の補正に関しては、瞳座標依存性の高い（像面座標依存性の低い）偏光収差（複屈折の影響）が発生することが多いため、投影光学系 P L 中の複数の光学部材 e 1 ～ e 4 のうちの少なくとも 1 つの光学部材に関して複屈折量及び分布を算出することが好ましい。

10 ここで、このような複屈折量及び分布を有する非結晶材料からなる光学部材は、当該光学部材の有効径を  $\phi_c$  とし、第 1 面 R 上の所定の 1 点から発する光束が当該光学部材を通過するときの光束径を  $\phi_p$  とするとき、

$$(7) \quad 0.6 < \phi_p / \phi_c \leq 1$$

15 を満足するような位置に配置されることが好ましい。このように所定の複屈折分布を有する光学部材を式 (7) を満足する位置に配置することにより、等軸晶系結晶材料からなる屈折部材に起因する偏光収差（複屈折の影響）を効果的に補正することが可能である。なお、さらに良好に偏光収差（複屈折の影響）を補正するためには、上記式 (7) の下限を 0.7 とすることが好ましい。

20 また、瞳座標依存性の高い（像面座標依存性の低い）偏光収差（複屈折の影響）を補正するための複屈折量及び分布を有する非結晶材料からなる光学部材は、投影光学系の瞳位置より 150 mm 以内の位置に配置されることが好ましい。

また、コマ収差等の像面座標依存性及び瞳座標依存性が同等に近い収差をより効果的に補正するためには、物点 Q 1 からの光束 L 1 及び物点 Q 2 からの光束 L 2 の重量の程度が中間的となる 2 つ光学部材の光学面に関する非球面形状を算出  
25 することが望ましいため、ステップ S 5 2 6 では、投影光学系 P L 中の複数の光学部材 e 1 ～ e 4 のうちの少なくとも 4 つの光学部材の光学面に関して非球面形

状を算出することがさらに好ましい。

5       なお、光学部材  $e_1 \sim e_4$  に形成する非球面は、光軸  $A_x$  に対して対称・非対称の何れであってもよい。更には、発生する収差に応じて不規則（ランダム）に非球面を形成しても良い。同様に、光学部材  $e_1 \sim e_4$  に設けられる複屈折分布は光軸  $A_x$  に対して対称・非対称の何れであってもよく、発生する変更収差に応じて不規則（ランダム）な複屈折分布を有していても良い。

10       ここで、ステップ S 5 2 6 で算出される非球面並びに複屈折量及び分布は、必ずしも投影光学系 PL に残存する波面収差の全てを補正する目的のものに限られず、特定の残存収差だけを補正する目的のものであっても良い。例えば、後述する外部調整機構で補正できる波面収差はこのステップ S 5 2 6 では敢えて補正せずに、外部調整機構で補正するようにしても良い。また、投影光学系 PL の残存波面収差の内、結像性能を鑑みて無視できるものは非球面形成又は複屈折分布付与により補正しなくとも良い。

15       （ステップ S 5 2 7） 図 1 3 に戻って、ステップ S 5 2 7 では、ステップ S 5 2 6 で選択された光学部材の光学面（レンズ面、反射面等）を、ステップ S 5 2 6 で算出された非球面形状となるように加工を行う。また、ステップ S 5 2 6 において、所定の光学部材の複屈折分布を変更する場合には、ステップ S 5 2 6 で算出された複屈折量及び分布を持つ光学材料を準備し、この光学材料の加工を行う。

20       （ステップ S 5 2 8） ステップ S 5 2 8 では、所定形状の非球面が加工された光学部材及び／又は所定の複屈折量及び分布を持つ光学部材を投影光学系へ組み込む。このとき、組み込み誤差が発生する恐れがあるが、ここで発生する組み込み誤差は、図 1 4 に示した収差測定装置で計測不可能となる程には大きくないと考えられるため、本実施例ではステップ S 5 1 6 へ移行する。

25       （ステップ S 5 2 9） さて、ステップ S 5 2 2 において、シミュレーションにより予測された収差が所定の規格内である場合（判断結果が「OK」である場合）



には、投影光学系 P L の光学特性が外部調整機構により微調整できる程度に調整されている場合であるため、外部調整機構の取り付けと、その初期調整を行う。

ここで、外部調整機構の初期調整では、図 1 5 に示したアクチュエータ 2 8 ~ 3 2 の制御信号に対する応答量を調整する処理が行われる。具体的には、例えば  
5 図示なき制御系からアクチュエータ 2 8 ~ 3 2 に対して  $1 \mu\text{m}$  伸長せよとの制御信号が出力されたときに、制御信号通りにアクチュエータ 2 8 ~ 3 2 が  $1 \mu\text{m}$  伸長しない場合があるので、制御系による制御量に対するアクチュエータ 2 8 ~ 3 2 の応答量を調整する。ここで、制御系から出力される制御信号は投影光学系 P L の光学的な性能を可変する信号であるので、つまりこの初期調整は、外部調整  
10 機構による調整量と投影光学系 P L の性能の変化量との相関を求める処理である。尚、アクチュエータ 2 8 ~ 3 2 が取り付けられると、外部調整機構を用いた調整のみが行われる。

(ステップ S 5 3 0) 以上のステップ S 5 2 9 が終了すると、上述のステップ S 5 1 6 で用いた波面測定装置を用いて波面収差計測を行う。このとき、上述の  
15 ステップ S 5 2 0 と同様に、波面収差計測結果に対してツェルニケの円筒関数系  $Z_n(\rho, \theta)$  をフィッティングして各項毎の展開係数  $C_n$  (ツェルニケ係数) を求め、波面収差の成分を算出する処理を行っても良い。

(ステップ S 5 3 1) 以上のステップ S 5 3 1 が終了すると、投影光学系の収差所定の規格内であるか否かが判断される。ステップ S 5 3 1 の判断結果が「N  
20 G」の場合には、ステップ S 5 3 2 へ移行する。また、ステップ S 5 3 1 の判断結果が「OK」の場合には、投影光学系 P L の製造が完了する。

(ステップ S 5 3 2) ステップ S 5 3 2 では、上述の外部調整機構を用いた調整を行いステップ S 5 2 9 へ移行する。ここで、ステップ S 5 3 1 の判断結果が「OK」となるまで、ステップ S 5 2 9 ~ S 5 3 2 を繰り返す。

25 なお、以上に説明した第 2 実施例の組立工程では、複数の偏光成分の波面収差を用いた調整を行ったが、非偏光成分のみを用いて波面収差を測定しても良い。

この場合には、波面収差のスカラー成分のみが既知となっているため、波面収差の偏光成分に影響を及ぼす光学部材のパラメータと、波面収差のスカラー成分の変化との相関をとり、この相関に基づいて、各ステップにおいて光学部材のパラメータ変更を行えば良い。

- 5       以上の通り、第2実施例に係る投影光学系の製造方法によれば、例えば蛍石やフッ化バリウム等の等軸晶系の結晶材料に起因する複屈折の影響を複数の偏光成分に関して評価しつつ、この等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材の結晶軸の組み込み角度を複屈折の影響（偏光収差）が極小となるように定め、かつ結晶軸方位の最適化のみでは補正しきれない複屈折の影響（偏光収差）を非結晶屈折部材
- 10       により補償することが可能であるため、良好な光学性能を確保できる。

次に、第3実施例として、第1実施例又は第2実施例に従って製造された投影光学系を備えた露光装置について図17を参照して説明する。図17は第3実施例に係る露光装置を概略的に示す図である。

- 15       図17において、例えば波長193nmのパルス光を供給するArFエキシマレーザからなる光源40からのパルス光は、X方向に沿って進行し、光路折り曲げプリズム41によって偏向されて、DOEターレット42に設けられた回折光学素子（DOE：Diffractive Optical Element）に入射する。このDOEターレット42には、互いに異なる種類の複数の回折光学素子が設けられている。これらの回折光学素子は、当該回折光学素子のファースフィールド（Far field）
- 20       領域において所定の断面形状、例えば円形断面、輪帯状断面、多重極断面（基準光軸に対して偏心した複数の極）を有する光束となるように、入射する光束を変換する。

- 25       この回折光学素子からの発散光束は、集光レンズ群43により集光され、マイクロフライアイレンズ44の位置の近傍に、回折光学素子のファースフィールド領域を形成する。ここで、マイクロフライアイレンズ44とは、2次元マトリックス状に配列された複数のレンズ面を1つ或いは複数の基板上に一体的に形成した

ものである。なお、マイクロフライアイレンズ44に代えて、2次元マトリックス状に集積された複数のレンズ素子を備えるフライアイレンズを用いても良い。また、回折光学素子とマイクロフライアイレンズ44との間に配置される集光レンズ群は、レンズを光軸方向へ移動させることにより焦点距離を連続的に変更することができるズーム光学系、レンズを交換することにより焦点距離を不連続的に変更することができる多焦点距離光学系などの変倍光学系とすることが好ましい。

さて、マイクロフライアイレンズ44の射出面側には複数の光源像からなる2次光源（面光源）が形成される。なお、マイクロフライアイレンズ44（又はフライアイレンズ）の入射面の位置に複数の光源の虚像を形成するようにしてもよい。

この2次光源からの光は、コンデンサ光学系45により集光されて、可変視野絞り46を重畳的に照明する。そして、可変視野絞り46からの光は、可変視野絞り46の開口部と第1面に配置された投影基板としてのレチクルRとをほぼ共役にするブラインド結像光学系47a～47cを介して、レチクルRに達する。

なお、本実施例においては、ブラインド結像光学系47a～47c中に2枚の光路折り曲げ鏡48a、48bを配置して、光路をほぼ180°偏向させている。ブラインド結像光学系47a～47cからの光により、レチクルR上のパターン形成領域の一部には、例えばスリット状の照野が形成される。この照野からの光は、上述の第1又は第2実施例の製造方法により得られた投影光学系PLを介して、投影光学系の第2面に配置されたワークピース（感光性基板）としてのウエハWに達し、このウエハWにスリット状の照野内のパターンの像を形成する。本実施例では、レチクルRを第1面上に支持するレチクルステージRSと、ウエハWを第2面上に支持するウエハステージとがY方向に移動可能となっており、投影光学系の倍率を $\beta$ とすると、当該倍率 $\beta$ の比でこれらのレチクルステージRSとウエハステージWSとを移動させつつ露光を行うことで、ウエハWS上に、スリット状の結像領域がY方向に掃引された形状、典型的には長方形のショッ

ト領域内にレチクルRのパターン形成領域内のパターン像を形成する。

1つのショット領域への走査露光が終了した後に、ウエハステージWSを駆動して、別のショット領域への走査露光を行い、ウエハWのほぼ全面に複数のショット領域を形成する。

- 5       なお、本実施例では、第1及び第2実施例の製造方法により製造された投影光学系を走査露光装置に適用した例を示したが、第1及び第2実施例の製造方法により製造された投影光学系は、一括露光型の投影露光装置にも適用できる。

10       また、本実施例の投影露光装置においては、光源からの光に基づいて第1面上に配置された投影基板としてのレチクルRを照明する照明光学系41～47cの少なくとも一部、特に光エネルギーが高くなる部位には、等軸晶系の結晶材料（例えば蛍石）からなる光学部材を用いている。このような照明光学系では、要求される光学性能が投影光学系に比して低いため、本実施例では照明光学系中の等軸晶系の結晶材料の結晶軸方位を最適化して複屈折の影響（偏光収差）を低減させることは行っていない。

- 15       但し、照明光学系に要求される光学性能が高い場合には、上述の第1及び第2実施例と同様に、等軸晶系の結晶材料の結晶軸方位の最適化を行ったり、非結晶材料からなる光学部材で等軸晶系の結晶材料に起因する複屈折の影響（偏光収差）を補正したりしても良い。

20       また、本実施例では、光源として波長193nmのパルス光を供給するArFエキシマレーザを適用したが、光源としては、例えば波長157nmのパルス光を供給するF<sub>2</sub>レーザ、波長147nmの光を供給するKr<sub>2</sub>レーザ、波長126nmの光を供給するAr<sub>2</sub>レーザを適用することもできる。

25       例えば光源として波長157nmのパルス光を供給するF<sub>2</sub>レーザを適用した際には、照明光学系41～47c中の光透過部材として、蛍石やフッ化バリウム等の等軸晶系の結晶材料や、フッ素がドーピングされた石英（改質石英）を用いることができる。特に、上記マイクロフライアイレンズ44の光学材料としては、加

工の容易さと硝路長の短さとを鑑みて改質石英とすることが好ましい。

さて、次に第4実施例として、双晶からなる屈折部材を用いた投影光学系について説明する。図18は第4実施例の投影光学系を模式的に示す図である。なお、以下に説明する第4実施例の投影光学系も上記第3実施例の投影露光装置の投影光学系として適用できるものである。

図18Aは双晶からなる屈折部材51と非結晶材料からなる屈折部材52とを備えた投影光学系の概略的な構成をしめし、図18Bは屈折部材51における結晶51aの結晶軸を示し、図18Cは屈折部材51における結晶51bの結晶軸を示している。なお、これら図18A、図18B及び図18Cの座標系は図示の通り共通している。

図18A、図18B及び図18Cに示す通り、双晶からなる屈折部材51は、双晶面又は双晶境界50Sを境として互いに接している同一相の2つの結晶51a、51bが所定の共通の低指数の結晶軸（本実施例では結晶軸 $[111]$ ）の周りに $180^\circ$ 回転した方位関係となっているもの、或いは互いに接している同一相の2つの結晶が所定の結晶面（本例では $\{111\}$ 面）に関して鏡像関係となっているものである。

この構成では、双晶からなる屈折部材51では、2つの結晶51a、51bの結晶軸 $[111]$ が光軸Axと一致し、かつ結晶51aに対して結晶51bが光軸Axを中心としてXY平面内で $180^\circ$ 回転されている。これは、2つの結晶51a、51bの結晶軸 $[111]$ が光軸Axと一致し、かつ結晶51aに対して結晶51bが光軸Axを中心としてXY平面内で $60^\circ$ 回転される構成と等価であるため、上述の図11に示した投影光学系と同じ理由により、複屈折の影響（偏光収差）を結晶51aと結晶51bとで互いにほぼキャンセルすることが可能である。なお、このとき、結晶51a、51bでキャンセルしきれない複屈折の影響（偏光収差）を上述の実施例と同様に、非結晶材料からなる光学部材52で補正することも可能である。

以上の通り、本実施例では、複屈折の影響が双晶面又は双晶境界の前後で互いに逆向きとなることを利用して、結晶屈折部材全体で固有複屈折による光学性能の悪化を低減することが可能である。これにより、投影光学系の光学性能を確保することが可能となる。

- 5        さて、上述の実施例では、等軸晶系の結晶材料からなる光学部材の結晶軸  $[111]$  を光軸と一致させた例を示したが、光軸と一致させる結晶軸は、結晶軸  $[111]$  及び当該結晶軸  $[111]$  と等価な結晶軸には限定されない。

10        以下、第5実施例として、等軸晶系の結晶材料からなる複数の屈折部材のうち所定の第1群の光軸を結晶軸  $[100]$  または該結晶軸  $[100]$  と光学的に等価な結晶軸とほぼ一致させ、第1群とは異なる所定の第2群の光軸を結晶軸  $[100]$  または該結晶軸  $[100]$  と光学的に等価な結晶軸とほぼ一致させ、これら第1群及び第2群を光軸を中心として  $45^\circ$  だけ相対的に回転させた例を説明する。

15        図19は、第5実施例の手法を説明する図であって、前述した図11B及び図11Cと同様に、光線の入射角に対する複屈折の分布を示している。第5実施例の手法では、第1群の屈折部材における複屈折の分布は図19(a)に示すようになり、第2群の屈折部材における複屈折の分布は図19(b)に示すようになる。その結果、第1群の屈折部材と第2群の屈折部材との全体における複屈折の分布は、図19(c)に示すようになる。

20        図19の(a)及び図19の(b)を参照すると、第5実施例の手法では、光軸と一致している結晶軸  $[100]$  に対応する領域は、比較的大きな屈折率を有する複屈折のない領域となる。また、結晶軸  $[111]$ ,  $[1-11]$ ,  $[-11-1]$ ,  $[11-1]$  に対応する領域は、比較的小さな屈折率を有する複屈折のない領域となる。さらに、結晶軸  $[101]$ ,  $[10-1]$ ,  $[110]$ ,  $[1-10]$  に対応する領域は、周方向の偏光 ( $\theta$  偏光) に対する屈折率が比較的大きく径方向の偏光 (R 偏光) に対する屈折率が比較的小さい複屈折領域となる。このように、

25

各群のレンズ素子では、光軸から  $45^\circ$ （結晶軸  $[100]$  と結晶軸  $[101]$  とのなす角度）の領域において、複屈折の影響を最大に受けることがわかる。

一方、図 19 の (c) を参照すると、第 1 群の屈折部材と第 2 群の屈折部材とを光軸を中心として  $45^\circ$  だけ相対的に回転させることにより、第 1 群の屈折部材と第 2 群の屈折部材との全体では、複屈折が最大である結晶軸  $[101]$ ,  $[10-1]$ ,  $[110]$ ,  $[1-10]$  の影響がかなり薄められ、光軸から  $45^\circ$  の領域すなわち光軸から離れた領域において径方向の偏光（R 偏光）に対する屈折率よりも周方向の偏光（ $\theta$  偏光）に対する屈折率が高い複屈折領域が残ることになる。この場合、一般の投影光学系において各レンズ素子における光軸と光束との最大角度は  $35^\circ \sim 40^\circ$  程度である。従って、第 5 実施例の手法を採用することにより、結晶軸  $[101]$ ,  $[10-1]$ ,  $[110]$ ,  $[1-10]$  の複屈折の影響を実質的に受けることなく、良好な結像性能を確保することができる。

なお、上述の説明において、第 1 群の屈折部材及び第 2 群の屈折部材は、それぞれ 1 つまたは複数の屈折部材を有する。そして、第 1 群の屈折部材又は第 2 群の屈折部材が複数の屈折部材を含む場合、複数の屈折部材は必ずしも隣接する屈折部材には限られない。本実施例における屈折部材の群の概念は、後述の第 3 群～第 6 群の屈折部材についても同様である。第 5 実施例の手法では、第 1 群の屈折部材の光軸に沿った厚さの総計と第 2 群の屈折部材の光軸に沿った厚さの総計とがほぼ等しいことが好ましい。

ところで、前述の図 11B の (c) と図 19 の (c) とを参照すると、図 11 の手法における光軸から  $35.26^\circ$  の領域での複屈折の方向と、第 5 実施例の手法における光軸から  $45^\circ$  の領域での複屈折の方向とが逆である。従って、第 5 実施例の手法と図 11A、図 11B 及び図 11C で説明した手法とを組み合わせる手法を採用することにより、複屈折の影響を実質的に受けることなく、良好な結像性能を確保することができる。

次に第 6 実施例として、上記第 5 実施例の手法と、図 11A、図 11B 及び図 1

1cで説明した手法とを組み合わせた例を説明する。

第6実施例の手法では、等軸晶系の結晶材料からなる複数の屈折部材のうち、  
所定の第1群の屈折部材の光軸を結晶軸 $[100]$ （または該結晶軸 $[100]$ と  
光学的に等価な結晶軸）と一致させ、第1群とは異なる第2群の屈折部材の光軸  
5 を結晶軸 $[100]$ （または該結晶軸 $[100]$ と光学的に等価な結晶軸）と一致  
させ、第1群の屈折部材と第2群の屈折部材とを光軸を中心として $45^\circ$ だけ相  
対的に回転させる。さらに、所定の第3群の屈折部材の光軸を結晶軸 $[111]$   
（または該結晶軸 $[111]$ と光学的に等価な結晶軸）と一致させ、第3群とは  
異なる第4群の屈折部材の光軸を結晶軸 $[111]$ （または該結晶軸 $[111]$ と  
10 光学的に等価な結晶軸）と一致させ、第3群の屈折部材と第4群の屈折部材とを  
光軸を中心として $60^\circ$ だけ相対的に回転させる。

ここで、結晶軸 $[111]$ と光学的に等価な結晶軸とは、結晶軸 $[-111]$ ,  
 $[1-11]$ ,  $[11-1]$ である。第6実施例の手法では、第1群の屈折部材の  
光軸に沿った厚さの総計と第2群の屈折部材の光軸に沿った厚さの総計とがほぼ  
15 等しく、且つ第3群の屈折部材の光軸に沿った厚さの総計と第4群の屈折部材の  
光軸に沿った厚さの総計とがほぼ等しいことが好ましい。

次に、第7実施例として、等軸晶系の結晶材料からなる複数の屈折部材のうち、  
少なくとも1つの屈折部材の光軸と結晶軸 $[100]$ （または該結晶軸 $[100]$   
と光学的に等価な結晶軸）と一致させた例について説明する。

20 上記図11Bの(a)及び図11Bの(b)を参照すると、屈折部材の光軸と結  
晶軸 $[111]$ とを一致させているので、複屈折が最大の結晶軸 $[110]$ ,  $[1$   
 $01]$ ,  $[011]$ に対応する領域が $120^\circ$ ピッチで存在し、瞳面内で $3\theta$ の分  
布を有する複屈折の影響すなわち像面（ウエハ面）においてコマ収差が発生する  
ような影響が現れるものと考えられる。

25 これに対して、図19の(a)及び図19の(b)を参照すると、屈折部材の  
光軸と結晶軸 $[100]$ とを一致させているので、複屈折が最大の結晶軸 $[10$



1],  $[1\ 0\ -1]$ ,  $[1\ 1\ 0]$ ,  $[1\ -1\ 0]$  に対応する領域が  $90^\circ$  ピッチで存在し、腫面内で  $4\theta$  の分布を有する複屈折の影響が現れる。

5 この場合、ウェハに投影すべきパターンにおいて縦横パターンが支配的であるため、 $4\theta$  の分布であれば縦横パターンに対して非点収差が発生するような影響が現れることなく、像の崩れも顕著にならない。従って、等軸晶系の結晶材料からなる複数の屈折部材のうち、少なくとも1つの屈折部材の光軸と結晶軸  $[1\ 0\ 0]$  (または該結晶軸  $[1\ 0\ 0]$  と光学的に等価な結晶軸) と一致させる第7実施例の手法を採用することにより、複屈折の影響を実質的に受けることなく、良好な結像性能を確保することができる。

10 次に、第8実施例として、等軸晶系の結晶材料からなる複数の屈折部材のうち所定の第5群の光軸を結晶軸  $[1\ 1\ 0]$  または該結晶軸  $[1\ 1\ 0]$  と光学的に等価な結晶軸とほぼ一致させ、第5群とは異なる所定の第6群の光軸を結晶軸  $[1\ 1\ 0]$  または該結晶軸  $[1\ 1\ 0]$  と光学的に等価な結晶軸とほぼ一致させ、これら第5群及び第6群を光軸を中心として  $90^\circ$  だけ相対的に回転させた例を説明する。

15 図20は、本発明の第8実施例の手法を説明する図であって、上述の図11B及び図11C、図19と同様に、光線の入射角に対する複屈折の分布を示している。第8実施例の手法では、第5群の屈折部材における複屈折の分布は図20の(a)に示すようになり、第6群の屈折部材における複屈折の分布は図20の(b)に示すようになる。その結果、第5群の屈折部材と第6群の屈折部材との全体における複屈折の分布は、図20の(c)に示すようになる。

20 図20の(a)および図20の(b)を参照すると、第8実施例の手法では、光軸と一致している結晶軸  $[1\ 1\ 0]$  に対応する領域は、一方の方向の偏光に対する屈折率が比較的大きく他方の方向(一方の方向に直交する方向)の偏光に対する屈折率が比較的小さい複屈折領域となる。また、結晶軸  $[1\ 0\ 0]$ ,  $[0\ 1\ 0]$  25 に対応する領域は、比較的大きな屈折率を有する複屈折のない領域となる。さら

に、結晶軸  $[1\ 1\ 1]$ ,  $[1\ 1\ -1]$  に対応する領域は、比較的小さな屈折率を有する複屈折のない領域となる。

5 一方、図 20 の (c) を参照すると、第 5 群の屈折部材と第 6 群の屈折部材とを光軸を中心として  $90^\circ$  だけ相対的に回転させることにより、第 5 群の屈折部材と第 6 群の屈折部材との全体では、複屈折が最大である結晶軸  $[1\ 1\ 0]$  の影響がほとんどなく、光軸付近は中間的な屈折率を有する複屈折のない領域となる。すなわち、第 8 実施例の手法を採用すると、複屈折の影響を実質的に受けることなく、良好な結像性能を確保することができる。

10 第 8 実施例の手法においても、第 5 群の屈折部材の光軸に沿った厚さの総計と第 6 群の屈折部材の光軸に沿った厚さの総計とがほぼ等しいことが好ましい。特に、第 8 実施例の手法では、複屈折領域が中央部（光軸およびその近傍）にあるので、中央部の薄い負レンズに適用することがさらに好ましい。

なお、以上説明した 4 つの手法から適宜選択した 1 つの手法を採用する、或いは 4 つの手法から選択した複数の手法を組み合わせることもできる。

15 また、等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材においては、当該屈折部材を通過する光線の光軸に対する最大角度が  $20^\circ$  を超えるような場合には、その配置位置にかかわらず複屈折の影響を受けやすい。そこで、通過する光線の光軸に対する最大角度が  $20^\circ$  を越えるような等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材に対して、図 11A、図 11B 及び図 11C に示した手法、第 5 ～ 第 8 実施例に示した手法を単独或いは組み合わせる適用することが好ましい。この構成により、複屈折の影響をさらに良好に低減でき良好な光学性能を確保できる。

20 また、像側開口数の大きい投影光学系では、瞳位置（中間結像点を有する複数回結像光学系の場合には最も像側（第 2 面側）の瞳位置）よりも第 2 面側に配置されたレンズにおいて、通過する光線の光軸に対する最大角度が大きい傾向にある。そこで、最も第 2 面側の瞳位置と第 2 面との間に配置される屈折部材のうち  
25 等軸晶系の結晶材料で形成される屈折部材に対して、図 11 に示した手法、第 5

～第8実施例に示した手法を単独或いは組み合わせて適用することが好ましい。  
この構成により、複屈折の影響をさらに良好に低減でき良好な光学性能を確保できる。

また、等軸晶系の結晶材料からなる複数の屈折部材のうち、所定の結晶軸と光  
5 軸とがほぼ一致するように形成された第7群の光透過部材と、所定の結晶軸と光  
軸とがほぼ一致するように形成された第8群の光透過部材とは、投影光学系の最  
大開口数に対応する光線が第7群の光透過部材を通過する際の硝路長を $L_7$ とし、  
投影光学系の最大開口数に対応する光線が前記第8群の光透過部材を通過する際  
の硝路長を $L_8$ とし、所定の波長を $\lambda$ とすると、(9)  $|L_7 - L_8| / \lambda <$   
10  $3 \times 10^{-5}$ なる条件式を満足することが好ましい。この構成によれば、像側開口  
数の大きい投影光学系であっても、これら第7群と第8群との光透過部材により、  
複屈折の影響を低減することが可能となる。なお、さらに複屈折の影響を低減す  
るためには、上記(9)式の上限值を $2.6 \times 10^{-5}$ に設定することが好ましい。

以下、具体的な数値に基づく実施例を説明する。

15 図21は、本発明に係る第1実施例にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図  
である。本実施例の投影光学系は、光学材料として石英 $SiO_2$ 及び蛍石 $CaF_2$   
を使用しており、第1面に配置されたレチクルRの像を第2面に配置されたウエ  
ハW上に投影する。

この投影光学系は、レチクルR側より順に、正の屈折力を有する第1レンズ群  
20 G1、負の屈折力を有する第2レンズ群G2、及び正の屈折力を有する第3レン  
ズ群G3を有する。ここで、第1レンズ群G1は、蛍石で形成された正の屈折力  
を有するレンズLP11を含む。第3レンズ群G3は、蛍石で形成されたレンズ  
LP12、LP13、LP14、LP15を含む。また、開口絞りASは第3レン  
ズ群G3中に配置されている。第1実施例の投影光学系の基準波長は193.  
25 3nm(ArFエキシマレーザ)であり、両側テレセントリックな光学系である。

さて、第1実施例において、正の屈折力を有する第1レンズ群G1は第1面か

ら射出するテレセントリックな光束を第2レンズ群G2にリレーすると共に、正の歪曲収差を予め発生させ、これにより第2、第3レンズ群G2、G3で発生する負の歪曲収差を補正している。負の屈折力を有する第2レンズ群G2は主にペッツバル和の補正に寄与し、像面の平坦性を実現させている。正の屈折力を有する第3レンズ群G3は第2レンズ群G2からリレーした光束に基づいて、主に球面収差の発生を極力抑制した状態で、第2面上に像をテレセントリックな光束のもとで結像させる役割を担っている。

ArFレーザに対して石英硝材は吸収やコンパクション等の照射変動が発生することは知られている。ここで、正の屈折力を有する第1レンズ群に少なくとも1枚以上の蛍石硝材を使用することによって、石英硝材による照射変動の収差劣化を押さえる事ができるようになる。第1レンズ群では、光軸中心を通る光束（パーシャル径）と周辺を通る光束はレンズ面で比較的に離れている為、第1レンズ群で照射変動が発生した場合、コマ収差や投影エリアにおける中心と周辺の差等が顕著になり、収差変動が大きくなる。よって、第1レンズ群G1に蛍石を使用することにより、照射変動による収差劣化を効率よく抑制することができる。また、本実施例の投影光学系においては、第1レンズ群G1中の蛍石で形成されたレンズ成分のうちの少なくとも1つのレンズ成分は、正の屈折力を有すること事が望ましい。上述のように、第1レンズ群G1に起因するコマ収差や投影エリアにおける中心と周辺の差などの照射変動による収差劣化の影響は、他のレンズ群に起因するものより大きい。特に、凸レンズでは、硝材を通過する光路長が周辺光束に比べ光軸中心を通る光束の方がより長く、よって硝材の照射変動の影響を受けやすい。このように、照射変動による収差変動を効率よく制御するという点で蛍石硝材は正の屈折力を有するレンズに使用する事が望ましい。また、石英との屈折率差によって色消しをするという点から見ても、蛍石硝材は正の屈折力を有するレンズに使用する事が望ましい。

また、第3レンズ群G3は、少なくとも1つの前記蛍石で形成されたレンズ成

分を有することが好ましい。本実施例の投影光学系では、第2レンズ群G2によって発散した光束が第3レンズ群G3によって収束してゆくため、第3レンズ群G3の各レンズにおける照射エネルギー密度が高くなる。このことが照射変動の1種であるコンパクションの発生原因となる。第3レンズ群に蛍石硝材を使用すれば、このコンパクションの影響を軽減させる効果が得られる。さらに、蛍石硝材を照射エネルギー密度が集中する面上近くの厚みのある硝材に使用すれば、より効率よくコンパクションを補正できる。

以下の表1に第1実施例にかかる投影光学系の諸元値を示す。表1において、 $\beta$ は投影倍率（横倍率）、NAは像側（第2面側）開口数、Bは像面上でのイメージサークルの直径をそれぞれ表している。また、表1において、面番号は、物体面（第1面）であるレチクル面から像面（第2面）であるウエハ面への光線の進行する方向に沿ったレチクル側からの順序を、 $r$ は各面の曲率半径（非球面の場合には頂点曲率半径）、 $d$ は各面の光軸上の面間隔をそれぞれ示している。

また、各非球面における非球面係数を表2に示す。非球面は、光軸に垂直な方向の高さを $y$ とし、非球面の頂点における接平面から高さ $y$ における非球面上の位置までの光軸に沿った距離（サグ量）を $Z$ とし、頂点曲率半径を $r$ とし、円錐係数を $K$ とし、 $n$ 次の非球面係数を $A \sim F$ としたとき、以下の式（10）で表される。

(10) 
$$Z = (y^2 / r) / [1 + \{1 - (1 + K) \cdot y^2 / r^2\}^{1/2}] + A \cdot y^4 + B \cdot y^6 + C \cdot y^8 + D \cdot y^{10} + E \cdot y^{12} + F \cdot y^{14}$$
 なお、表2において各非球面係数の欄に記載される $E_m$ は10mを表している。ここで、本実施例の諸元値における曲率半径、面間隔の単位の一例としては、mmを用いることができる。波長193.3nmにおける各硝材の屈折率を以下に示す。

SiO<sub>2</sub> 1.5603261  
CaF<sub>2</sub> 1.5014548

【表 1】

$$\beta = -0.25$$

$$NA = 0.78$$

$$B = 27.4$$

5	面番号	曲率半径	面間隔	硝材
			56.57	
	1	388.465	23.27	SiO <sub>2</sub>
	2	177.000	42.53	
	3	-120.028	15.00	SiO <sub>2</sub>
10	4	-752.332	16.54	
	5	-193.722	44.12	SiO <sub>2</sub>
	6	-192.988	1.00	
	7	-799.710	42.35	SiO <sub>2</sub>
	8	-240.979	1.00	
15	9	666.130	51.12	SiO <sub>2</sub>
	10	-543.380	1.00	
	11	299.996	49.64	SiO <sub>2</sub>
	12	$\infty$	1.00	
	13	276.988	35.60	SiO <sub>2</sub>
20	14	991.456	1.00	
	15	252.935	30.34	CaF <sub>2</sub>
	16	574.560	30.59	
	17	687.760	19.37	SiO <sub>2</sub>
	18	143.863	30.27	
25	19	-399.976	15.00	SiO <sub>2</sub>
	20	170.000	87.67	

	21	-128.314	26.18	SiO <sub>2</sub>
	22	804.730	21.59	
	23	-570.040	51.47	SiO <sub>2</sub>
	24	950.000	10.24	
5	25	$\infty$	35.89	CaF <sub>2</sub>
	26	-250.424	1.02	
	27	$\infty$	41.69	CaF <sub>2</sub>
	28	-262.449	13.09	
	29	290.060	56.21	SiO <sub>2</sub>
10	30	1757.000	26.96	
	31	$\infty$	15.03	SiO <sub>2</sub>
	32	276.988	34.69	
	33	533.910	48.23	SiO <sub>2</sub>
	34	-471.548	15.61	
15	35	$\infty$	32.96	SiO <sub>2</sub>
	36	-490.708	2.60	
	37	199.138	42.55	SiO <sub>2</sub>
	38	439.306	3.65	
	39	170.020	49.30	SiO <sub>2</sub>
20	40	300.000	1.66	
	41	154.428	45.93	CaF <sub>2</sub>
	42	522.270	5.77	
	43	$\infty$	60.00	CaF <sub>2</sub>
	44	1687.460	11.35	

25

【表 2】

(非球面係数)

[面番号 2]

$$K = 0.000000$$

$$A = -0.106010E-06$$

$$B = 0.204228E-11$$

$$5 \quad C = -0.588237E-16$$

$$D = 0.112269E-20$$

[面番号 1 4]

$$K = 0.000000$$

$$A = 0.417491E-08$$

$$10 \quad B = 0.514111E-13$$

$$C = -0.666592E-18$$

$$D = 0.141913E-22$$

[面番号 2 0]

$$K = 0.000000$$

$$15 \quad A = 0.166854E-07$$

$$B = 0.370389E-12$$

$$C = -0.138273E-16$$

$$D = -0.304113E-20$$

[面番号 2 4]

$$20 \quad K = 0.000000$$

$$A = 0.361963E-07$$

$$B = -0.679214E-12$$

$$C = -0.128267E-16$$

$$D = 0.908964E-21$$

$$25 \quad E = -0.121007E-25$$

[面番号 4 0]



$$K = 0.000000$$

$$A = -0.179608E-07$$

$$B = 0.149941E-12$$

$$C = -0.128914E-17$$

$$5 \quad D = -0.506694E-21$$

$$E = 0.204017E-25$$

$$F = -0.730011E-30$$

10 さて、本実施例では、投影光学系を構成する光学部材のうちの蛍石よりなるレンズ成分 LP11～LP15 の方位角（光軸周りの回転角）を調整することによって、複屈折による悪影響（偏光収差）を補正している。

図 2 2A は、蛍石よりなるレンズ成分 LP11～LP15 を、蛍石の結晶軸  $[111]$  が光軸と一致しかつそれぞれの方位角を同じ方向に揃えた場合における光軸上での点像強度分布を示す。なお、図 2 2A において、PSF の最大値は 90.72 である。

15 図 2 2B は、蛍石よりなるレンズ成分 LP11～LP15 のうちレンズ成分 LP14 の方位角を、他の蛍石レンズ成分 LP11～LP13, LP15 に対して光軸周りに相対的に  $180^\circ$  回転させた場合の光軸上での点像強度分布を示す。なお、図 2 2B において、PSF の最大値は 96.41 である。

20 これら図 2 2A 及び図 2 2B を参照すると、蛍石よりなるレンズ成分 LP11～LP15 の結晶軸の方位角が全て揃った場合（図 2 2A の場合）には、スカラー収差の  $3\theta$  成分が大きく、かつ PSF 値も 90.6 程度と低いのに対し、レンズ成分 LP14 の方位角を、他の蛍石レンズ成分 LP11～LP13, LP15 に対して光軸周りに相対的に  $180^\circ$  回転させた場合（レンズ成分 LP14 と蛍石レンズ成分 LP11～LP13, LP15 との相対的な方位角が  $60^\circ$  である場合と等価、図 2 2B の場合）には、スカラー収差の  $3\theta$  成分が小さくなり、かつ PSF 値も 96.4 程度まで上

がる。このように、等軸晶系結晶材料の結晶軸の方位角を変更することにより、投影光学系の光学性能の改善が図れる。

図 2 2 C は、図 2 2 B の状態（レンズ成分 LP14 の方位角を、他の蛍石レンズ成分 LP11～LP13, LP15 に対して光軸周りに相対的に  $180^\circ$  回転させた状態）に加え、投影光学系中の石英からなるレンズ成分 LS1～LS17 のうち、瞳近傍のレンズ成分 LS12 及び LS14 に、図 2 2 B で示される収差を補正するための複屈折分布を与えたものである。これにより、P S F 値の最大値が 99.86 となり、投影光学系の光学性能のさらなる改善が図れる。

さて、図 2 2 A—図 2 2 C に示した例では、投影光学系中の蛍石レンズ成分の結晶軸  $[111]$  を光軸と一致させた手法を用いたが、別の結晶軸と光軸とを一致させても良い。

図 2 3 A は、図 2 2 A と同様に、蛍石よりなるレンズ成分 LP11～LP15 を、蛍石の結晶軸  $[111]$  が光軸と一致しかつそれぞれの方位角を同じ方向に揃えた場合における光軸上での点像強度分布を示す。そして、図 2 3 B は、蛍石レンズ成分 LP11～LP15 のうち、レンズ成分 LP11、LP12 及び LP13 の光軸を蛍石の結晶軸  $[100]$  と一致させ、レンズ成分 LP14 及び LP15 の光軸を蛍石の結晶軸  $[110]$  と一致させた例である。

そして、結晶軸  $[100]$  を光軸に持つレンズ成分 LP11、LP12 及び LP13 において、レンズ成分 LP11 及び LP13 の光軸周りの方位角を揃え、レンズ成分 LP12 の方位角をレンズ成分 LP11 及び LP13 に対して  $45^\circ$  だけ光軸周りに回転させている。また、結晶軸  $[110]$  を光軸に持つレンズ成分 LP14 及び LP15 において、一方のレンズ成分の方位角に対して他方のレンズ成分の方位角を  $90^\circ$  だけ光軸周りに回転させている。

比較例としての図 2 3 A と図 2 3 B とを参照すると、図 2 3 B の場合では、P S F 値の最大値が 99.4 であり、良好な光学性能を有していることが分かる。なお、図 2 3 B においては、わずかに残存する偏光収差成分を補正するために、図

2 2c の場合と同様に、石英からなるレンズ成分 LS1～LS17 のうちの少なくとも 1 つのレンズ成分に所定の複屈折分布を与えて、光学性能のさらなる改善を図っても良い。

図 2 4 は、本発明に係る第 2 実施例にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図である。本実施例の投影光学系は、光学材料として石英 SiO<sub>2</sub> 及び蛍石 CaF<sub>2</sub> を使用しており、第 1 面に配置されたレチクル R の像を第 2 面に配置されたウエハ W 上に投影する。第 2 実施例の投影光学系は、蛍石で形成された正の屈折力を有するレンズ LP11～LP16 と、石英で形成されたレンズ LS1～LS16 とを含む。第 2 実施例の投影光学系の基準波長は 193.3 nm (ArF エキシマレーザ) であり、両側テレセントリックな光学系である。

以下の表 3 に第 2 実施例にかかる投影光学系の諸元値を示す。表 3 における符号の意味は表 1 と同様であるため、ここでは説明を省略する。

また、各非球面における非球面係数を表 4 に示す。非球面形状は、上述の (10) 式で表される。なお、表 4 において各非球面係数の欄に記載される Em は 10m を表している。

ここで、本実施例の諸元値における曲率半径、面間隔の単位の一例としては、mm を用いることができる。なお、波長 193.3 nm における各硝材の屈折率は、上記第 1 実施例で示した通りである。

【表 3】

$$\beta = -0.25$$

$$NA = 0.85$$

$$B = 23.4$$

面番号	曲率半径	面間隔	硝材
1	-16644.993	14.681	SiO <sub>2</sub>
2	200.000	38.160	
3	-97.636	39.394	SiO <sub>2</sub>

	4	-3498.612	1.963	
	5	20854.806	47.225	C a F <sub>2</sub>
	6	-189.240	1.000	
	7	-1848.127	33.691	S i O <sub>2</sub>
5	8	-335.321	1.000	
	9	1292.071	37.309	S i O <sub>2</sub>
	10	-600.215	1.331	
	11	492.732	38.730	S i O <sub>2</sub>
	12	-3044.576	77.326	
10	13	190.000	48.156	C a F <sub>2</sub>
	14	833.704	12.324	
	15	177.093	34.107	S i O <sub>2</sub>
	16	525.225	8.344	
	17	1357.022	39.940	S i O <sub>2</sub>
15	18	104.862	40.492	
	19	-211.803	13.000	S i O <sub>2</sub>
	20	167.689	25.248	
	21	-172.613	14.042	S i O <sub>2</sub>
	22	207.257	6.376	
20	23	377.821	39.683	C a F <sub>2</sub>
	24	-169.378	86.157	
	25	-380.085	20.000	S i O <sub>2</sub>
	26	515.903	7.314	
	27	504.576	50.802	C a F <sub>2</sub>
25	28	-308.601	1.000	
	29	1127.574	30.958	S i O <sub>2</sub>

	30	-781.573	19.652	
	31	763.980	52.719	SiO <sub>2</sub>
	32	-331.674	21.193	
	33	-211.490	25.066	SiO <sub>2</sub>
5	34	-300.000	26.763	
	35	1063.093	41.880	SiO <sub>2</sub>
	36	-559.169	1.000	
	37	189.378	50.245	SiO <sub>2</sub>
	38	764.962	1.000	
10	39	145.835	35.087	SiO <sub>2</sub>
	40	235.771	1.000	
	41	178.250	45.678	CaF <sub>2</sub>
	42	406.631	6.433	
	43	-5014.697	43.998	CaF <sub>2</sub>
15	44	∞	10.500	

## 【表 4】

(非球面係数)

[面番号 2]

K = 0.000000

20 A = -1.460090E-07

B = 5.901790E-12

C = -2.851310E-16

D = 2.350150E-20

E = -2.375080E-24

25 F = 1.914710E-28

[面番号 16]

$$K = 0.000000$$

$$A = 2.294100E-08$$

$$B = -2.794170E-13$$

$$C = 1.017110E-17$$

$$5 \quad D = 5.514660E-22$$

$$E = -5.807000E-26$$

$$F = 4.364070E-30$$

[面番号 2 2]

$$K = 0.000000$$

$$10 \quad A = 7.961350E-09$$

$$B = -3.690120E-12$$

$$C = 1.927460E-17$$

$$D = 5.305600E-21$$

$$E = -2.919800E-26$$

$$15 \quad F = -2.770450E-29$$

[面番号 2 6]

$$K = 0.000000$$

$$A = 2.103660$$

$$E-08 B = -6.466850E-13$$

$$20 \quad C = -6.551390E-18$$

$$D = 2.426880E-22$$

$$E = 1.189120E-27$$

$$F = -3.538550E-31$$

[面番号 4 0]

$$25 \quad K = 0.000000$$

$$A = -1.693250E-08$$

$$B = 6.620660E-13$$

$$C = -9.551420E-18$$

$$D = -1.367360E-21$$

$$E = 1.080030E-25$$

5  $F = -4.115960E-30$

さて、本実施例では、投影光学系を構成する光学部材のうちの蛍石よりなるレンズ成分 LP11～LP16 の方位角（光軸周りの回転角）を調整することによって、複屈折による悪影響（偏光収差）を補正している。

10 図 2 5 A は、比較のために蛍石の固有複屈折の影響を無視した場合における光軸上での点像強度分布を示す。なお、図 2 5 A において、P S F の最大値は 99.97 である。

15 図 2 5 B は、蛍石よりなるレンズ成分 LP11～LP16 を、蛍石の結晶軸 [1 1 1] が光軸と一致しかつそれぞれの方位角を同じ方向に揃えた場合における光軸上での点像強度分布を示す。なお、図 2 5 A において、P S F の最大値は 94.57 である。

20 図 2 5 C は、蛍石よりなるレンズ成分 LP11～LP16 のうちレンズ成分 LP11 の方位角を、他の蛍石レンズ成分 LP12～LP14, LP16 に対して光軸周りに相対的に 60° 回転させ、かつレンズ成分 LP15 の方位角を、他の蛍石 LP12～LP14, LP16 に対して光軸周りに相対的に 60° 回転させた場合の光軸上での点像強度分布を示す。なお、図 2 5 C において、P S F の最大値は 95.86 である。

25 これら図 2 5 B 及び図 2 5 C を参照すると、蛍石よりなるレンズ成分 LP11～LP16 の結晶軸の方位角が全て揃った場合（図 2 5 B の場合）には、スカラー収差の 3θ 成分が大きく、かつ P S F 値も 94.6 程度と低いのに対し、レンズ成分 LP11 の方位角を、他の蛍石レンズ成分 LP12～LP14, LP16 に対して光軸周りに相対的に 60° 回転させ、かつレンズ成分 LP15 の方位角を他の蛍石レンズ成分 LP12～LP14, LP16 に対して光軸周りに相対的に 60° 回転させた場合（図 2 5

c の場合) には、スカラー収差の  $3\theta$  成分が小さくなり、かつ P S F 値も 9 5 . 8 程度まで上がる。このように、等軸晶系結晶材料の結晶軸の方位角を変更することにより、投影光学系の光学性能の改善が図れる。

図 2 5 D は、図 2 5 C の状態 ( レンズ成分 LP11, LP15 の方位角を、他の蛍石  
5 レンズ成分 LP12~LP14, LP16 に対して光軸周りに相対的に  $60^\circ$  回転させた  
状態) に加え、投影光学系中の石英からなるレンズ成分 LS1~LS16 のうち、瞳  
近傍のレンズ成分 LS14 に、図 2 5 C で示される収差を補正するための複屈折分  
布を与えたものである。これにより、P S F 値の最大値が 99.82 となる。ここで、  
図 2 5 A の理想的な状態と比較すると、図 2 5 A の場合の P S F の最大値が  
10 99.92 であるのに対し、図 2 5 D ではほぼ等しい値まで P S F の最大値が向上し  
ており、投影光学系の光学性能のさらなる改善が図れていることが明らかである。

さて、図 2 5 A-図 2 5 D に示した例では、投影光学系中の蛍石レンズ成分の結  
晶軸  $[111]$  を光軸と一致させた手法を用いたが、上述の第 1 実施例と同様に  
別の結晶軸と光軸とを一致させても良い。

図 2 6 A は、投影光学系中の蛍石レンズ成分 LP11~LP16 のうち、レンズ成分  
15 LP11 及び LP12 の光軸を蛍石の結晶軸  $[110]$  と一致させ、レンズ成分 LP13  
及び LP14 の光軸を蛍石の結晶軸  $[100]$  と一致させ、レンズ成分 LP15 及び  
LP16 の光軸を蛍石の結晶軸  $[111]$  と一致させた場合の点像強度分布を示す。  
この図 2 6 A の場合において、結晶軸  $[110]$  を光軸に持つレンズ成分 LP11  
20 及び LP12 において、一方のレンズ成分の方位角に対して他方のレンズ成分の方  
位角を  $90^\circ$  だけ光軸周りに回転させている。また、結晶軸  $[100]$  を光軸に  
持つレンズ成分 LP13 及び LP14 において、一方のレンズ成分の方位角に対して  
他方のレンズ成分の方位角を  $45^\circ$  だけ光軸周りに回転させている。また、結晶  
軸  $[111]$  を光軸に持つレンズ成分 LP15 及び LP16 において、一方のレンズ  
25 成分の方位角に対して他方のレンズ成分の方位角を  $60^\circ$  だけ光軸周りに回転さ  
せている。



比較例としての図25Bと図26Aとを参照すると、図26Aの場合では、P S F値の最大値が98.76であり、良好な光学性能を有していることが分かる。

また、図26Bは、図26Aの状態に加え、投影光学系中の石英からなるレンズ成分LS1～LS16のうち、瞳近傍のレンズ成分LS14に、図26Aで示される収差を補正するための複屈折分布を与えた場合における光軸上での点像強度分布である。これにより、P S F値の最大値が99.76となる。ここで、図25Aの理想的な状態と比較すると、図25Aの場合のP S Fの最大値が99.92であるのに対し、図25Dではほぼ等しい値までP S Fの最大値が向上しており、投影光学系の光学性能のさらなる改善が図れていることが明らかである。

上述の各実施例の露光装置では、照明装置によってレチクル（マスク）を照明し（照明工程）、投影光学系を用いてマスクに形成された転写用のパターンを感光性基板に露光する（露光工程）ことにより、マイクロデバイス（半導体素子、撮像素子、液晶表示素子、薄膜磁気ヘッド等）を製造することができる。以下、各実施例の露光装置を用いて感光性基板としてのウエハ等に所定の回路パターンを形成することによって、マイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の手法の一例につき図27のフローチャートを参照して説明する。

まず、図27のステップ301において、1ロットのウエハ上に金属膜が蒸着される。次のステップ302において、その1ロットのウエハ上の金属膜上にフォトリジストが塗布される。その後、ステップ303において、各実施例の露光装置を用いて、マスク上のパターンの像がその投影光学系を介して、その1ロットのウエハ上の各ショット領域に順次露光転写される。その後、ステップ304において、その1ロットのウエハ上のフォトリジストの現像が行われた後、ステップ305において、その1ロットのウエハ上でレジストパターンをマスクとしてエッチングを行うことによって、マスク上のパターンに対応する回路パターンが、各ウエハ上の各ショット領域に形成される。

その後、更に上のレイヤの回路パターンの形成等を行うことによって、半導体

素子等のデバイスが製造される。上述の半導体デバイス製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する半導体デバイスをスループット良く得ることができ。なお、ステップ301～ステップ305では、ウエハ上に金属を蒸着し、その金属膜上にレジストを塗布、そして露光、現像、エッチングの各工程を行っているが、これらの工程に先立って、ウエハ上にシリコンの酸化膜を形成後、そのシリコンの酸化膜上にレジストを塗布、そして露光、現像、エッチング等の各工程を行っても良いことはいうまでもない。

また、各実施例の露光装置では、プレート（ガラス基板）上に所定のパターン（回路パターン、電極パターン等）を形成することによって、マイクロデバイスとしての液晶表示素子を得ることもできる。以下、図28のフローチャートを参照して、このときの手法の一例につき説明する。図28において、パターン形成工程401では、各実施例の露光装置を用いてマスクのパターンを感光性基板（レジストが塗布されたガラス基板等）に転写露光する、所謂光リソグラフィ工程が実行される。この光リソグラフィー工程によって、感光性基板上には多数の電極等を含む所定パターンが形成される。その後、露光された基板は、現像工程、エッチング工程、レチクル剥離工程等の各工程を経ることによって、基板上に所定のパターンが形成され、次のカラーフィルター形成工程402へ移行する。

次に、カラーフィルター形成工程402では、R (Red)、G (Green)、B (Blue) に対応した3つのドットの組がマトリックス状に多数配列されたり、またはR、G、Bの3本のストライプのフィルターの組を複数水平走査線方向に配列されたりしたカラーフィルターを形成する。そして、カラーフィルター形成工程402の後に、セル組み立て工程403が実行される。セル組み立て工程403では、パターン形成工程401にて得られた所定パターンを有する基板、およびカラーフィルター形成工程402にて得られたカラーフィルター等を用いて液晶パネル（液晶セル）を組み立てる。セル組み立て工程403では、例えば、パターン形成工程401にて得られた所定パターンを有する基板とカラーフィルター形成工

程 4 0 2 にて得られたカラーフィルターとの間に液晶を注入して、液晶パネル（液晶セル）を製造する。

その後、モジュール組み立て工程 4 0 4 にて、組み立てられた液晶パネル（液晶セル）の表示動作を行わせる電気回路、バックライト等の各部品を取り付けて

5 液晶表示素子として完成させる。上述の液晶表示素子の製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する液晶表示素子をスループット良く得ることができる。

#### 産業上の利用可能性

上述の通り、本発明によれば、例えば蛍石のような固有複屈折を示す結晶材料

10 を用いても、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を確保することができる投影光学系を製造することができる。

## 請求の範囲

1. 所定波長の光に基づいて第1面の像を第2面上に結像する投影光学系であって、前記所定波長の光に対して透過性を有する少なくとも1つの等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材を含む投影光学系の製造方法において、

5           第1の偏光成分及び該第1の偏光成分とは異なる第2の偏光成分の光に関する評価を行いつつ、前記少なくとも1つの等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材の結晶軸の方位を定める補助工程を含み、所定の設計データを得る設計工程と； 前記等軸晶系の結晶材料を準備する結晶材料準備工程と； 前記等軸晶系の結晶材料の結晶軸を測定する結晶軸測定工程と； 前記設計工程での前記設計  
10 データに基づいて、前記等軸晶系の結晶材料から所定形状の屈折部材を形成する屈折部材形成工程と； 前記設計工程で得られた前記屈折部材の結晶軸方位に基づいて、前記屈折部材を配置する組上工程と；を含むことを特徴とする投影光学系の製造方法。

2. 所定の複屈折分布を有する少なくとも1つの屈折部材を準備する工程をさらに含み、  
15

前記所定の複屈折分布は、前記設計工程での前記設計データに従って決定されることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の投影光学系の製造方法。

3. 前記所定の複屈折分布は、前記屈折部材が有する所定の応力複屈折分布、及び前記屈折部材に設けられる薄膜に起因する複屈折分布のうちの少なくとも一方であることを特徴とする請求の範囲第2項に記載の投影光学系の製造方法。  
20

4. 前記所定の複屈折分布を有する屈折部材は、石英またはフッ素がドープされた石英からなることを特徴とする請求の範囲第2又は3項に記載の投影光学系の製造方法。

25           5. 前記応力複屈折分布を有する屈折部材の有効径を $\phi c$ とし、前記第1面上の所定の1点から発する光束が前記応力複屈折分布を有する屈折部材を通

過するときの光束径を $\phi p$ とするとき、

0.  $6 < \phi p / \phi c \leq 1$  を満足することを特徴とする請求の範囲第2～4項の何れか一項に記載の投影光学系の製造方法。

5 6. 前記投影光学系中の少なくとも1つの光学部材の表面形状を非球面形状に形成する非球面創成工程をさらに含み、

該非球面形状は、前記設計工程での設計データに従って決定されることを特徴とする請求の範囲第1～5項の何れか一項に記載の投影光学系の製造方法。

7. 前記非球面形状は、前記光学部材の光軸に関して非対称な非球面形状を有することを特徴とする請求の範囲第6項に記載の投影光学系の製造方法。

10 8. 前記組上工程は、

組み上げられた前記投影光学系の光学性能を測定する光学性能測定補助工程と； 測定された前記光学性能を所定の光学性能とするために前記投影光学系中の少なくとも1つの光学部材の位置及び／又は姿勢を変更する光学部材調整補助工程と； 測定された前記光学性能を所定の光学性能とするために前記投影光学系中の少なくとも1つの光学部材の表面形状を非球面形状に形成する非球面加工補助工程と； を備えることを特徴とする請求の範囲第1～7項の何れか一項に記載の投影光学系の製造方法。

9. 前記非球面形状は、前記設計工程での設計データも考慮して定められることを特徴とする請求の範囲第8項に記載の投影光学系の製造方法。

20 10. 前記組上工程は、

前記等軸晶系からなる屈折部材の光軸周りの方位角を調整する方位角調整補助工程を含むことを特徴とする請求の範囲第1～9項の何れか一項に記載の投影光学系の製造方法。

11. 前記組上工程は、

25 複数の偏光成分の光に関して、組み上げられた前記投影光学系の光学性能を測定する偏光光学性能測定補助工程を含み、

前記方位角調整補助工程は、前記測定された複数の偏光成分に関する光学性能に基づいて、複数の偏光成分に関する光学性能が所定の値となるように前記等軸晶系からなる前記屈折部材の前記方位角を調整することを特徴とする請求の範囲第 10 項に記載の投影光学系の製造方法。

5            1 2.    前記組上工程は、

組み上げられた前記投影光学系の光学性能を測定する光学性能測定補助工程を含み、

10            前記方位角調整補助工程は、前記測定された光学性能に基づいて、前記投影光学系の光学性能が所定の値となるように前記等軸晶系からなる前記屈折部材の前記方位角を調整することを特徴とする請求の範囲第 10 項に記載の投影光学系の製造方法。

1 3.    前記等軸晶系の結晶材料は、フッ化カルシウム又はフッ化バリウムを有することを特徴とする請求の範囲第 1 ～ 1 2 項の何れか一項に記載の投影光学系の製造方法。

15            1 4.    前記所定の波長は、200nm 以下の波長であることを特徴とする請求の範囲第 1 ～ 1 3 項の何れか一項に記載の投影光学系の製造方法。

1 5.    所定波長の光に基づいて第 1 面の像を第 2 面上に結像する投影光学系であって、前記所定波長の光に対して透過性を有する少なくとも 1 つの等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材を含む投影光学系の製造方法において、

20            前記投影光学系中の屈折部材のうちの少なくとも 1 つの屈折部材を、該屈折部材とは異なる複屈折量及び／又は複屈折分布を有する別の屈折部材と交換する工程を含むことを特徴とする投影光学系の製造方法。

1 6.    前記別の屈折部材は、等軸晶系の結晶材料又は非結晶材料を有することを特徴とする請求の範囲第 1 5 項に記載の製造方法。

25            1 7.    所定波長の光に基づいて第 1 面の像を第 2 面上に結像する投影光

学系であって、前記所定波長の光に対して透過性を有する少なくとも1つの等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材を含む投影光学系の製造方法において、

5 偏光収差を補正するために、前記投影光学系中の所定の複屈折分布を有する光学部材の位置及び／又は姿勢を調整する工程を含むことを特徴とする投影光学系の製造方法。

1 8. 前記偏光収差は回転非対称な偏光収差を含むことを特徴とする請求の範囲第17項に記載の製造方法

10 1 9. 請求の範囲第1～18項の何れか一項に記載の製造方法に従って製造された投影光学系。

2 0. 所定波長の光に基づいて第1面の像を第2面上に結像する投影光学系において、

15 前記所定波長の光に対して透過性を有する少なくとも1つの等軸晶系の結晶材料からなる等軸晶系屈折部材と； 該等軸晶系屈折部材が有する固有複屈折による光学性能の悪化を補償するための非結晶材料からなる非結晶屈折部材と；を備えることを特徴とする投影光学系。

2 1. 前記等軸晶系屈折部材は、結晶軸 $[100]$ または該結晶軸 $[100]$ と光学的に等価な結晶軸と、前記等軸晶系屈折部材の光軸とがほぼ一致するように形成されていることを特徴とする請求の範囲第16項に記載の投影光学系。

2 2. 前記等軸晶系の結晶材料からなる等軸晶系屈折部材は、複数の等軸晶系屈折部材を含み、

25 該複数の等軸晶系屈折部材の結晶軸方位は、前記固有複屈折による光学性能の悪化を低減するようにそれぞれ定められていることを特徴とする請求の範囲第16項に記載の投影光学系。

23. 前記固有複屈折による前記光学性能の悪化を低減するように前記結晶軸方位が定められている前記等軸晶系屈折部材を通過する光線の光軸に対する角度の最大値は、20度を超えていることを特徴とする請求の範囲第18項に記載の投影光学系。

5           24. 前記固有複屈折による前記光学性能の悪化を低減するように前記結晶軸方位が定められている前記等軸晶系屈折部材は、前記投影光学系の最も前記第2面側の瞳位置と前記第2面との間に配置されることを特徴とする請求の範囲第18又は19項に記載の投影光学系。

          25. 前記複数の等軸晶系屈折部材は、  
10           結晶軸[100]または該結晶軸[100]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成された第1群の光透過部材と、

          結晶軸[100]または該結晶軸[100]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成された第2群の光透過部材とを備え、

          前記第1群の光透過部材と前記第2群の光透過部材とは、光軸を中心としてほ  
15           ぼ45°だけ相対的に回転した位置関係を有することを特徴とする請求の範囲第18～20項の何れか一項に記載の投影光学系。

          26. 前記複数の等軸晶系屈折部材は、  
          結晶軸[111]または該結晶軸[111]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成された第3群の光透過部材と、

20           結晶軸[111]または該結晶軸[111]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成された第4群の光透過部材とを備え、

          前記第3群の光透過部材と前記第4群の光透過部材とは、光軸を中心としてほ  
          ぼ60°だけ相対的に回転した位置関係を有することを特徴とする請求の  
          範囲第18～21項の何れか一項に記載の投影光学系。

25           27. 前記複数の等軸晶系屈折部材は、  
          結晶軸[110]または該結晶軸[110]と光学的に等価な結晶軸と



光軸とがほぼ一致するように形成された第 5 群の光透過部材と、

結晶軸  $[110]$  または該結晶軸  $[110]$  と光学的に等価な結晶軸と  
光軸とがほぼ一致するように形成された第 6 群の光透過部材とを備え、

5 前記第 5 群の光透過部材と前記第 6 群の光透過部材とは、光軸を中心としてほ  
ぼ  $90^\circ$  だけ相対的に回転した位置関係を有することを特徴とする請求の範囲第  
18～22 項の何れか一項に記載の投影光学系。

28. 前記複数の等軸晶系屈折部材は、

結晶軸  $[100]$  または該結晶軸  $[100]$  と光学的に等価な結晶軸と  
光軸とがほぼ一致するように形成された第 1 群の光透過部材と、

10 結晶軸  $[110]$  または該結晶軸  $[110]$  と光学的に等価な結晶軸と  
光軸とがほぼ一致するように形成された第 5 群の光透過部材とを備えていること  
を特徴とする請求の範囲第 18～20 項の何れか一項に記載の投影光学系。

29. 前記複数の等軸晶系屈折部材は、

15 結晶軸  $[111]$  または該結晶軸  $[111]$  と光学的に等価な結晶軸と  
光軸とがほぼ一致するように形成された第 3 群の光透過部材をさらに備えている  
ことを特徴とする請求の範囲第 24 項に記載の投影光学系。

30. 前記固有複屈折による前記光学性能の悪化を低減するように前記  
結晶軸方位が定められている前記複数の等軸晶系屈折部材は、所定の結晶軸と光  
軸とがほぼ一致するように形成された第 7 群の光透過部材と、所定の結晶軸と光  
20 軸とがほぼ一致するように形成された第 8 群の光透過部材とを備え、

前記投影光学系の最大開口数に対応する光線が前記第 7 群の光透過部材  
を通過する際の硝路長を  $L_7$  とし、前記投影光学系の最大開口数に対応する光線  
が前記第 8 群の光透過部材を通過する際の硝路長を  $L_8$  とし、前記所定の波長を  
 $\lambda$  とするとき、

25  $|L_7 - L_8| / \lambda < 3 \times 10^{-5}$  を満足することを特徴とする請求の範囲第 1  
8～25 項の何れか一項記載の投影光学系。

3 1. 前記第 7 群及び前記第 8 群の光透過部材を通過する光線の光軸に対する角度の最大値は、20 度を超えていることを特徴とする請求の範囲第 2 6 項に記載の投影光学系。

5 3 2. 前記第 7 群及び前記第 8 群の光透過部材は、前記投影光学系の最も前記第 2 面側の瞳位置と前記第 2 面との間に配置されることを特徴とする請求の範囲第 2 6 又は 2 7 項に記載の投影光学系。

3 3. 前記固有複屈折による光学性能の悪化のうちのスカラー成分を低減させるための非球面をさらに備えることを特徴とする請求の範囲第 1 6 ~ 2 8 項の何れか一項に記載の投影光学系。

10 3 4. 前記非球面は、前記非球面が設けられている屈折部材の光軸に関して回転非対称な形状を有していることを特徴とする請求の範囲第 2 9 項に記載の投影光学系。

3 5. 前記非結晶屈折部材は、応力複屈折分布を有していることを特徴とする請求の範囲第 1 6 ~ 3 0 項の何れか一項に記載の投影光学系。

15 3 6. 前記応力複屈折分布は、前記非結晶性屈折部材の製造時における不純物、熱履歴による密度分布のうちの少なくとも一方に起因して生成されることを特徴とする請求の範囲第 3 1 項に記載の投影光学系。

20 3 7. 前記非結晶光学部材は、石英またはフッ素がドーピングされた石英であることを特徴とする請求の範囲第 1 6 ~ 3 2 項の何れか一項に記載の投影光学系。

3 8. 前記等軸晶系屈折部材は、フッ化カルシウム又はフッ化バリウムを有することを特徴とする請求の範囲第 1 6 ~ 3 3 項の何れか一項に記載の投影光学系の製造方法。

25 3 9. 所定波長の光に基づいて第 1 面の像を第 2 面上に結像する投影光学系において、

前記所定波長の光に対して透過性を有する双晶からなる双晶屈折部材を

備えていることを特徴とする投影光学系。

40. 前記双晶屈折部材の双晶境界または双晶面は、前記双晶が有する固有複屈折による光学性能の悪化を低減するように定められていることを特徴とする請求の範囲第35項に記載の投影光学系。

5           41. 前記所定の波長は、200nm以下の波長であることを特徴とする請求の範囲第16～36項の何れか一項に記載の投影光学系。

42. 所定の波長の光に基づいて第1面に配置される投影原版の像を第2面に配置されるワークピースへ投影露光する投影露光装置において、  
前記所定波長の光を供給する光源と；

10           該光源と前記第1面との間の光路中に配置されて、前記光源からの前記光を前記投影原版へ導く照明光学系と； 前記第1面と前記第2面との間の光路中に配置されて、前記投影原版の像を前記第2面上に形成する請求の範囲第15～37項の何れか一項に記載の投影光学系と；を備えることを特徴とする投影露光装置。

15           43. 所定の波長の光に基づいて第1面に配置される投影原版の像を第2面に配置されるワークピースへ投影露光する投影露光方法において、

前記所定の波長の光を供給する工程と； 前記所定の波長の光を用いて前記投影原版を照明する工程と； 前記照明された前記投影原版からの光に基づいて、請求の範囲第15～37項の何れか一項に記載の投影光学系により前記第20   2面上に前記投影原版の像を形成する工程と；を備えることを特徴とする投影露光方法。

44. 所定波長の光に基づいて第1面に配置される投影原版の像を第2面に配置されるワークピースへ投影露光する投影露光装置に適用されて、前記所定波長の光に対して透過性を有する少なくとも1つの等軸晶系の結晶材料からなる屈折部材を含む照明光学系の製造方法において、

25           偏光収差を補正するために、前記等軸晶系の結晶材料からなる結晶屈折

部材の結晶軸方位を最適化する工程を含むことを特徴とする製造方法。

4 5. 残存する前記偏光収差を補正するための非結晶材料からなる非結晶屈折部材を準備する工程をさらに含むことを特徴とする請求の範囲第 4 4 項に記載の製造方法。

5            4 6. 所定の波長に基づいて第 1 面に配置される投影原板の像を第 2 面に配置されるワークピースへ投影露光する投影露光装置において、

前記所定波長の光を供給する光源と；

該光源と前記第 1 面との間に配置されて、前記光源からの前記光を前記投影原板へ導くための請求の範囲第 4 4 項又は第 4 5 項に記載の照明光学系と；

10            前記第 1 面と前記第 2 面との間の光路中に配置されて、前記投影原板の像を前記第 2 面上に形成する投影光学系と；  
を備えることを特徴とする投影露光装置。

4 7. 所定の波長に基づいて第 1 面に配置される投影原板の像を第 2 面に配置されるワークピースへ投影露光する投影露光方法において、

15            前記所定波長の光を供給する工程と；

請求の範囲第 4 4 項又は第 4 5 項に記載の照明光学系を介して前記所定の波長の光を用いて前記投影原板を照明する工程と；

前記照明された前記投影原板からの光に基づいて、前記第 2 面上に前記投影原板の像を形成する工程と；

20            を備えることを特徴とする投影露光方法。

図1

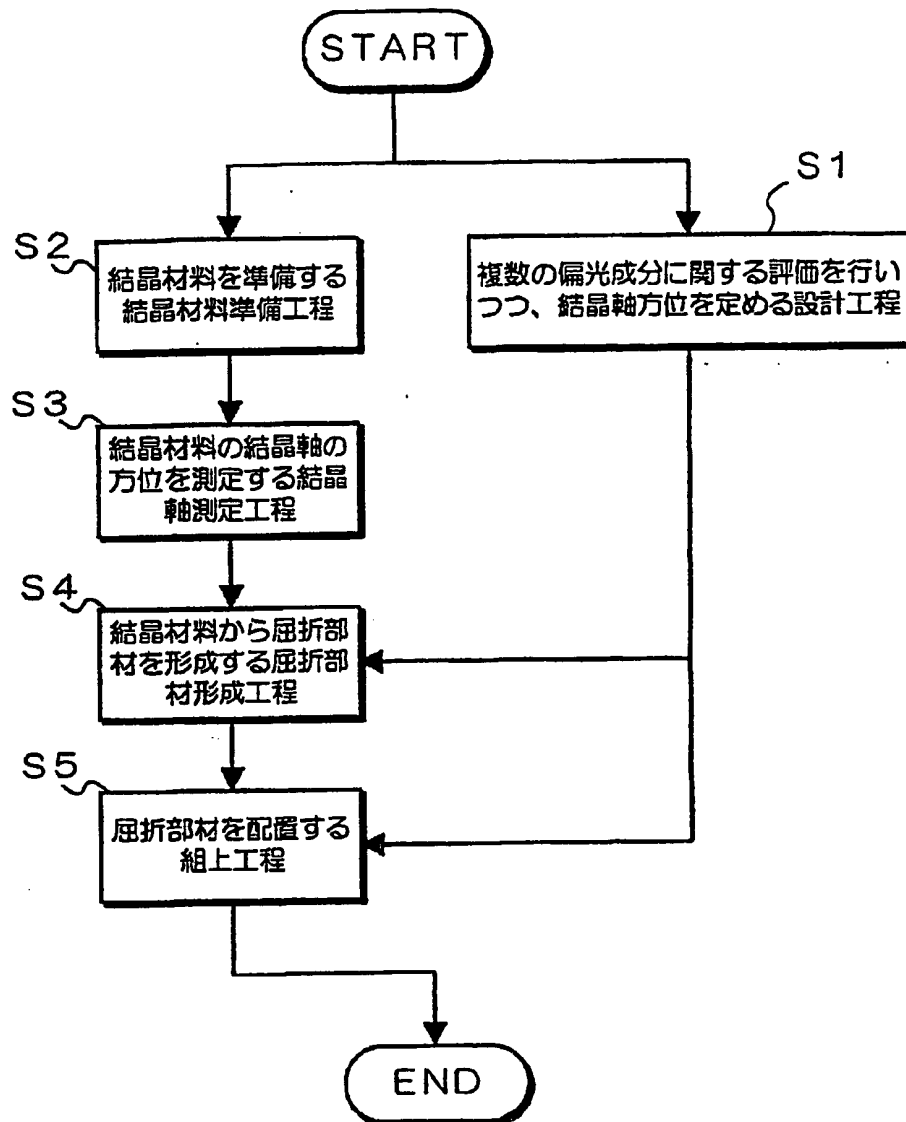


図2

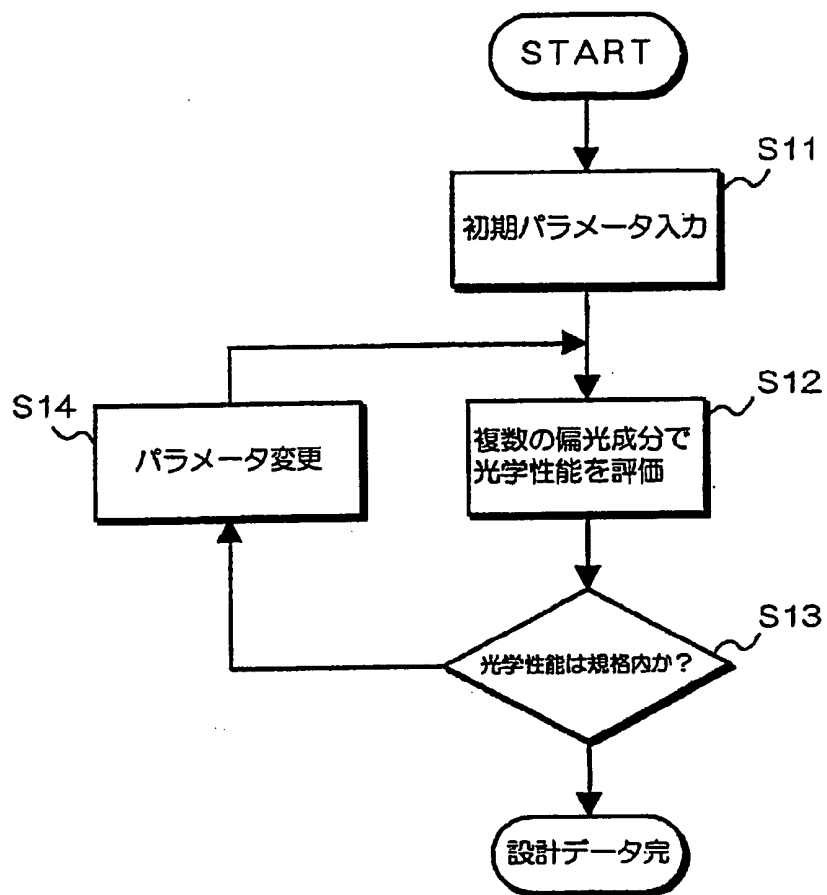


図3

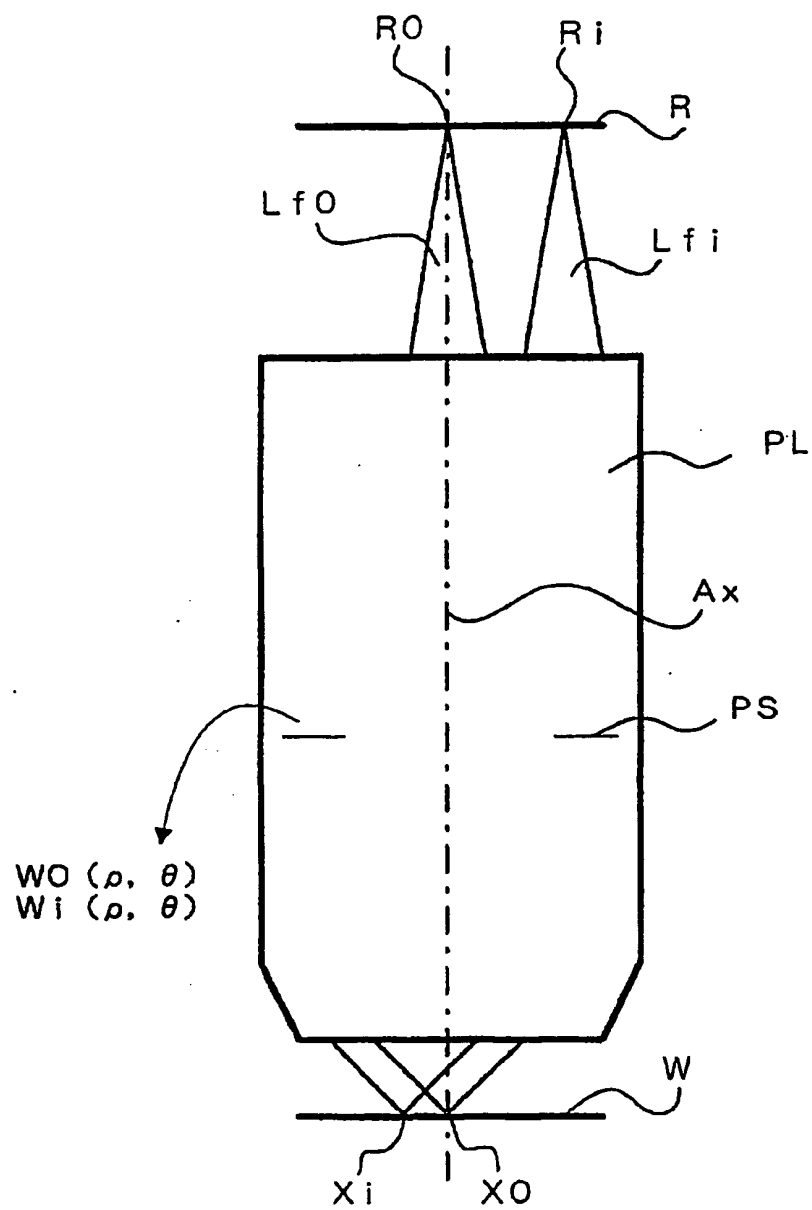


図4

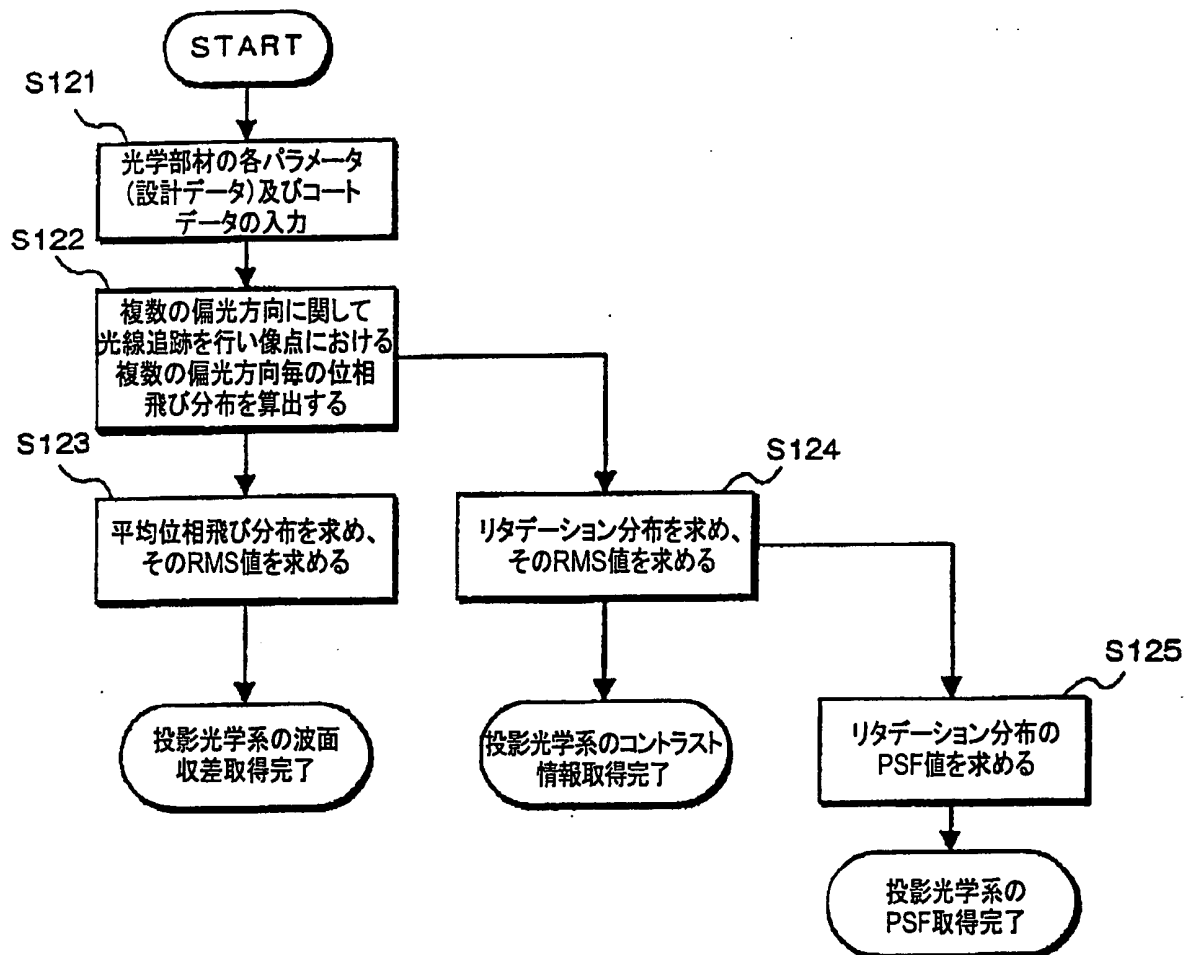




図5

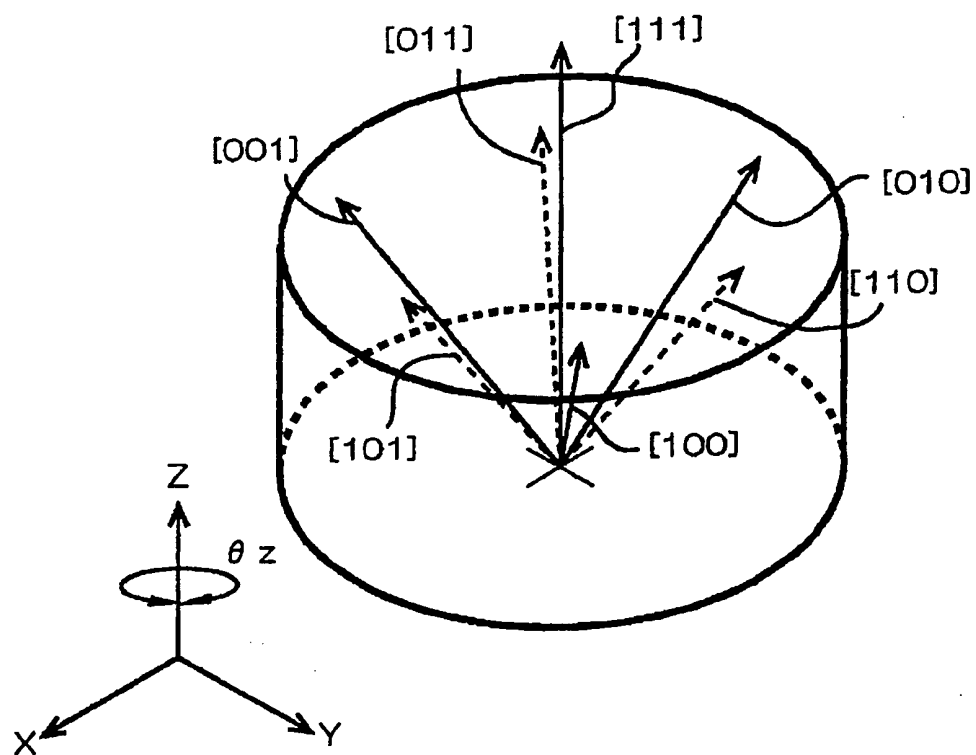


図6

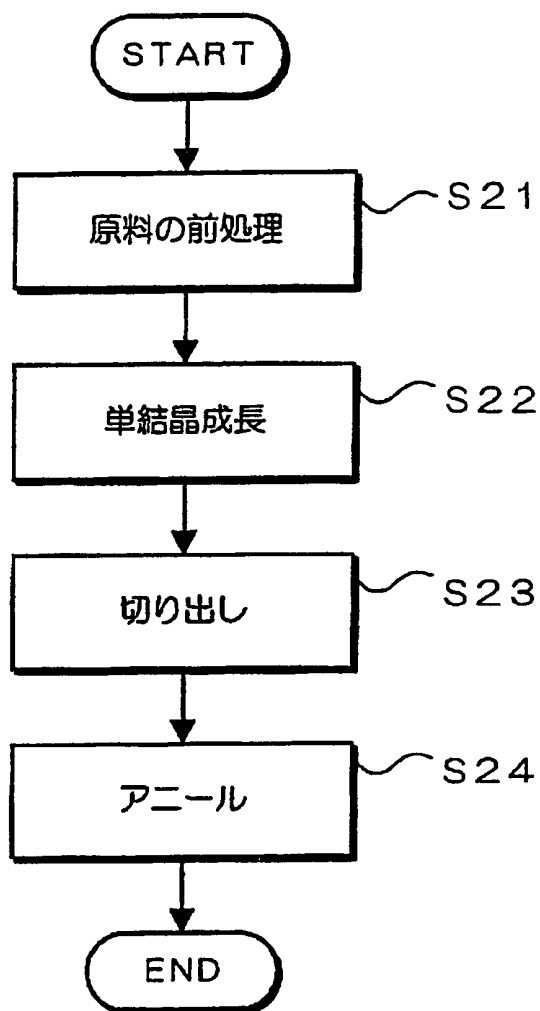


図7

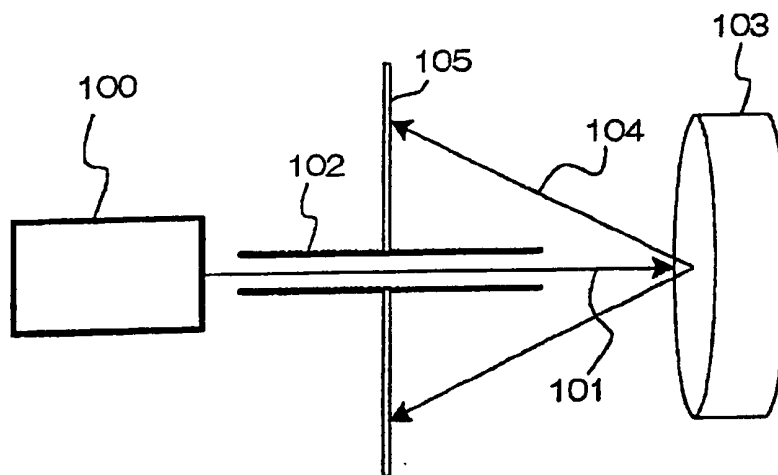


図8

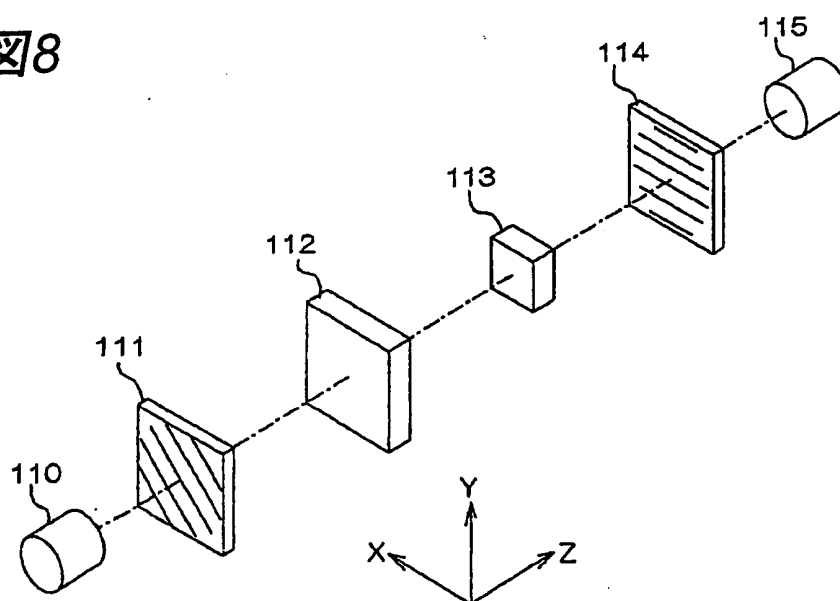


図9

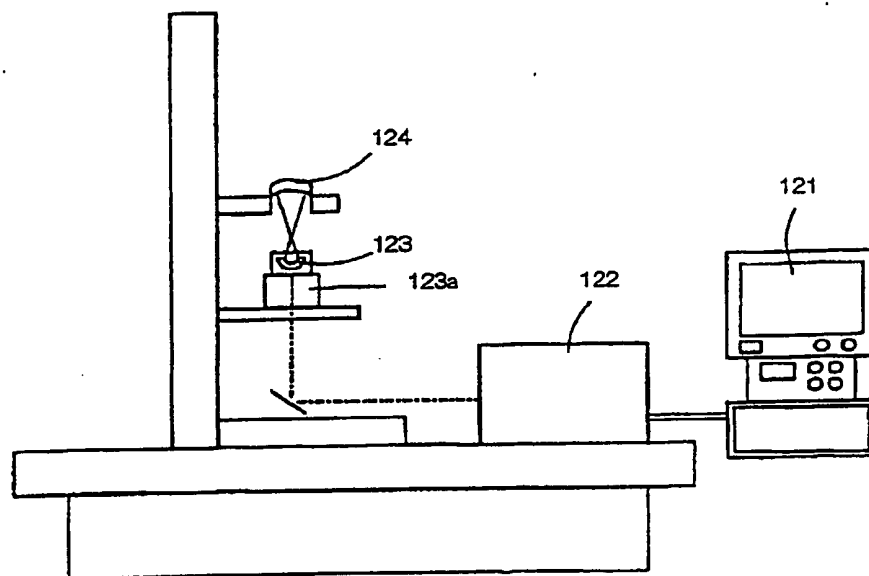
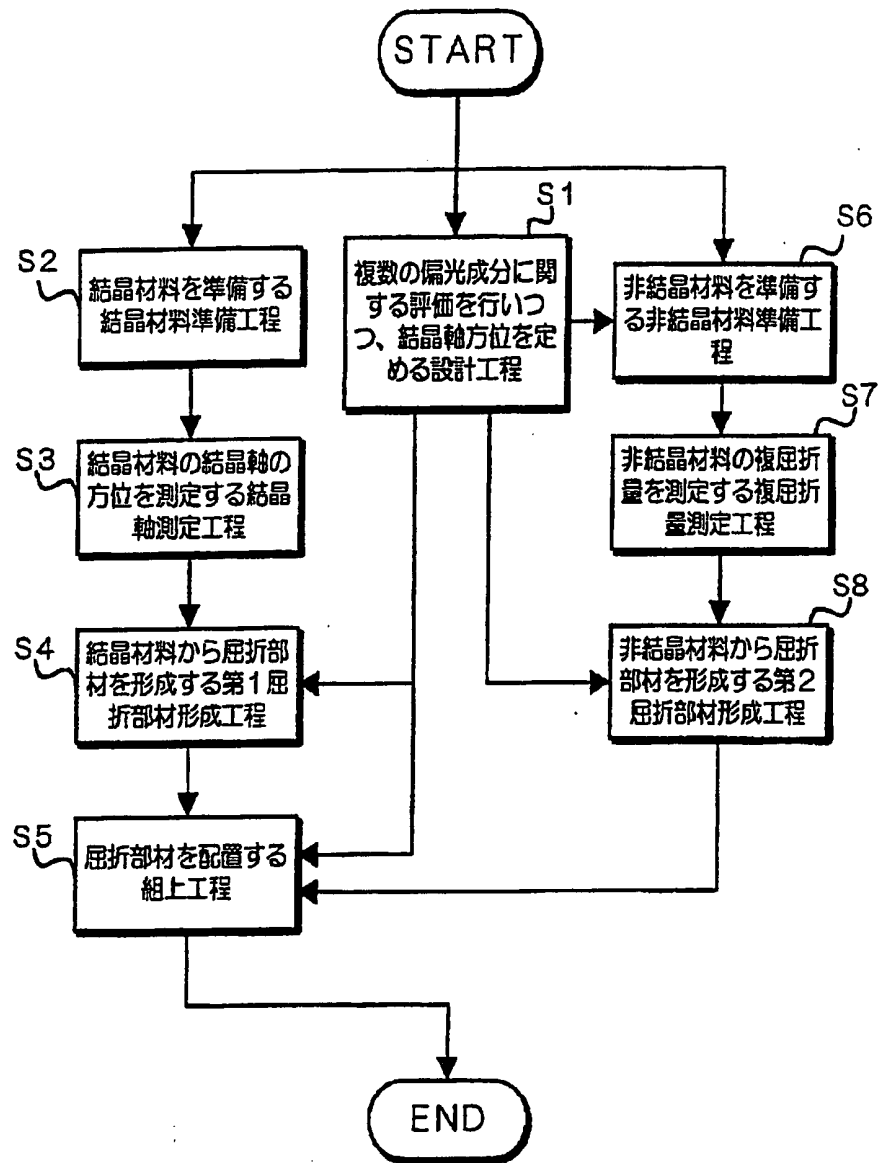


図10



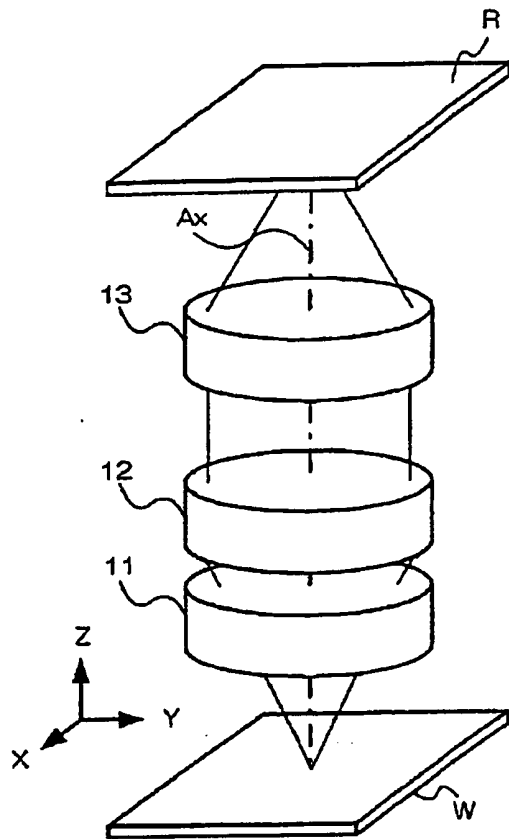


図11A

図11B

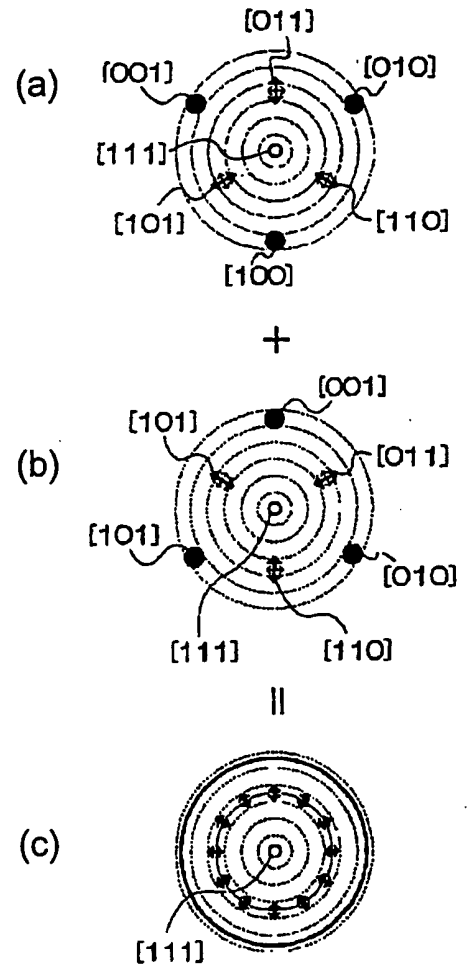


図11C

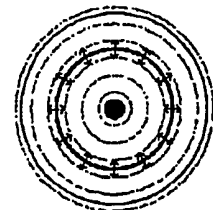


図12

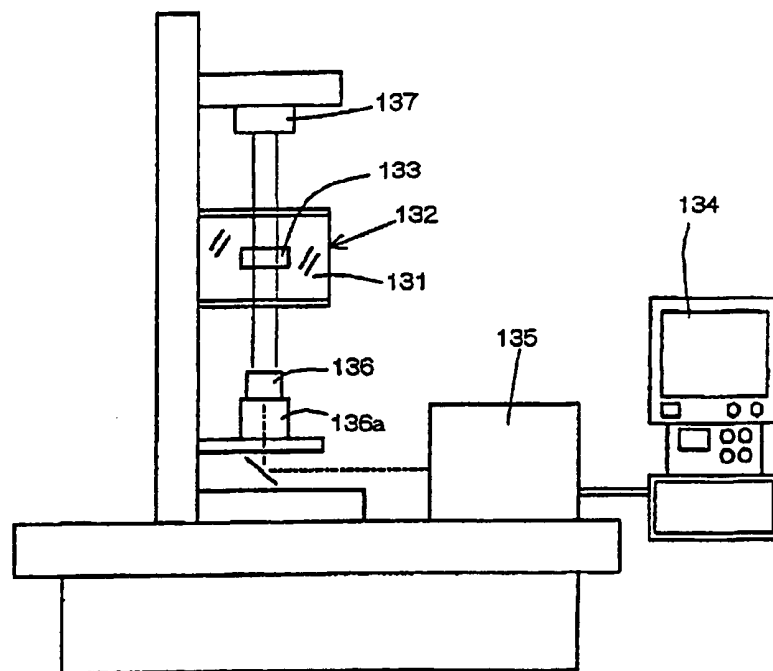


図13

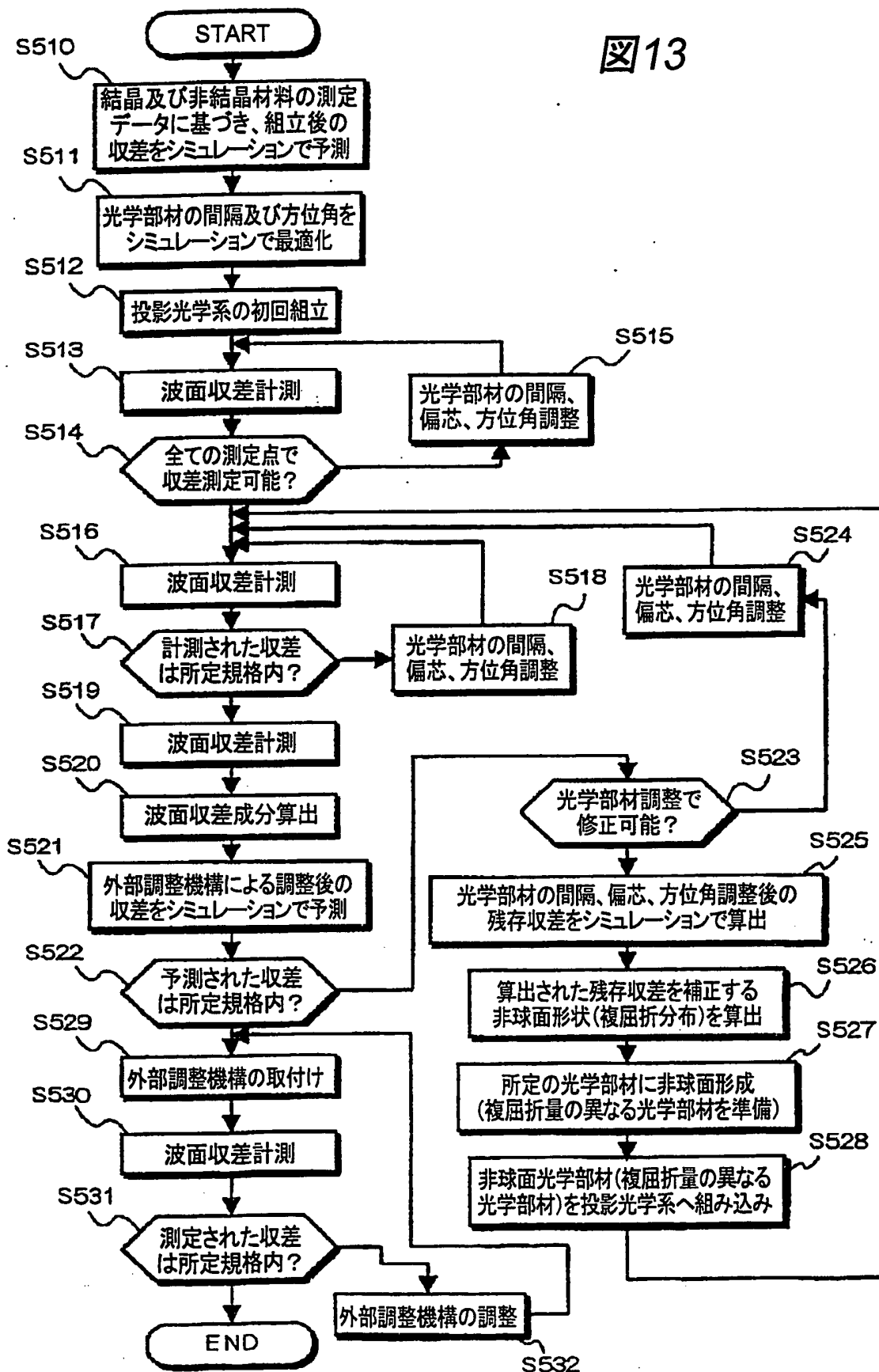




図14

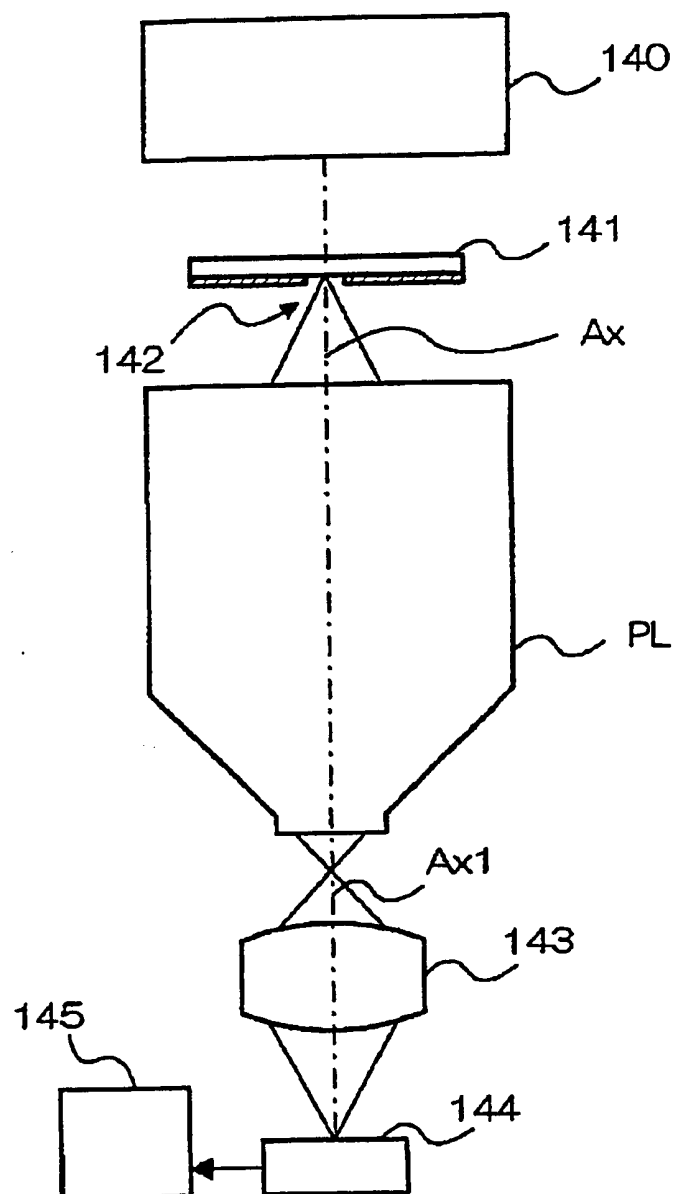
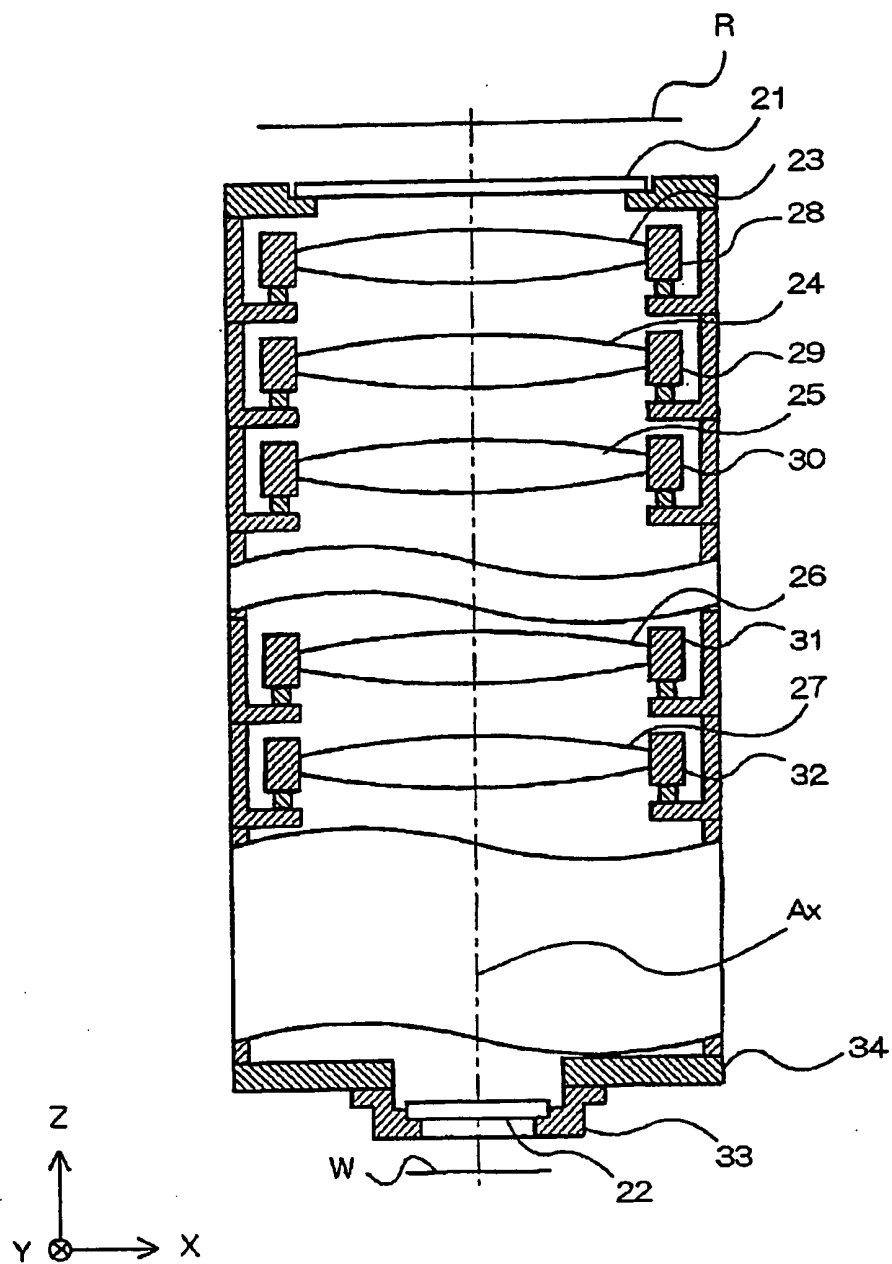


図15



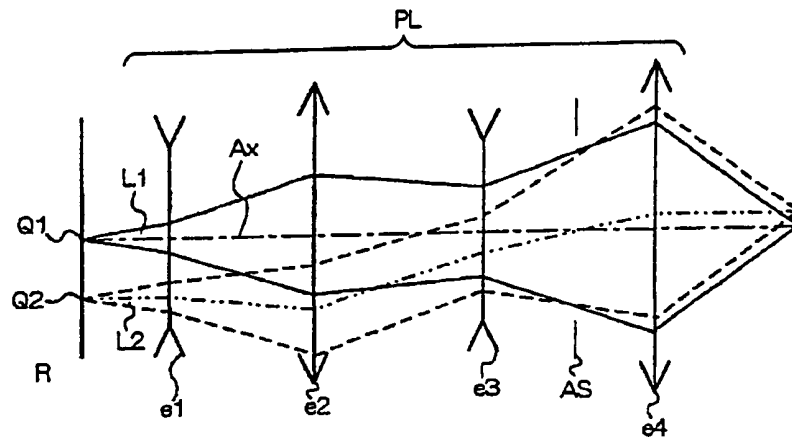


図16A

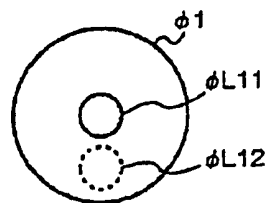


図16B

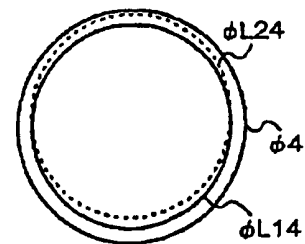
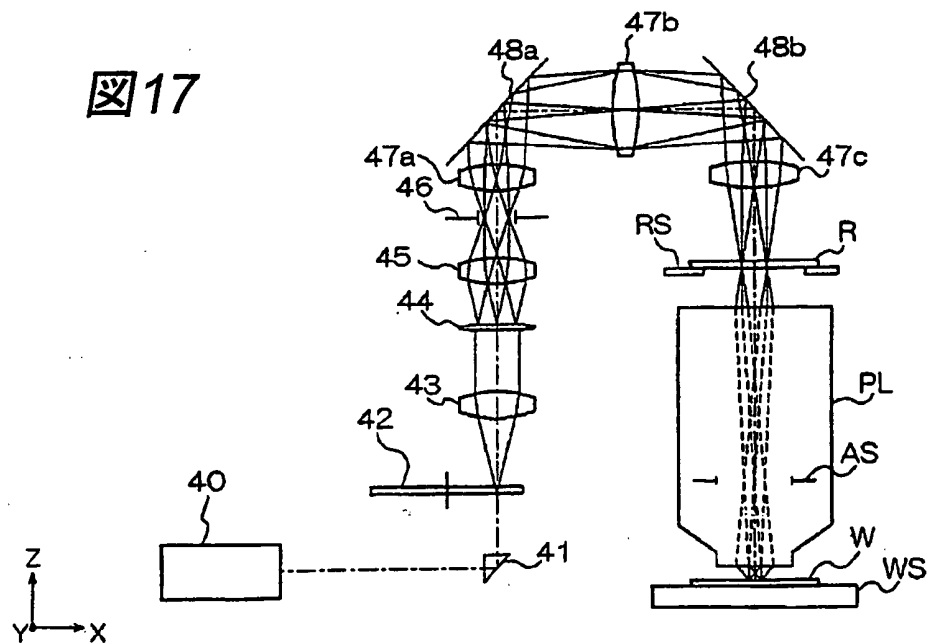


図16C

図17



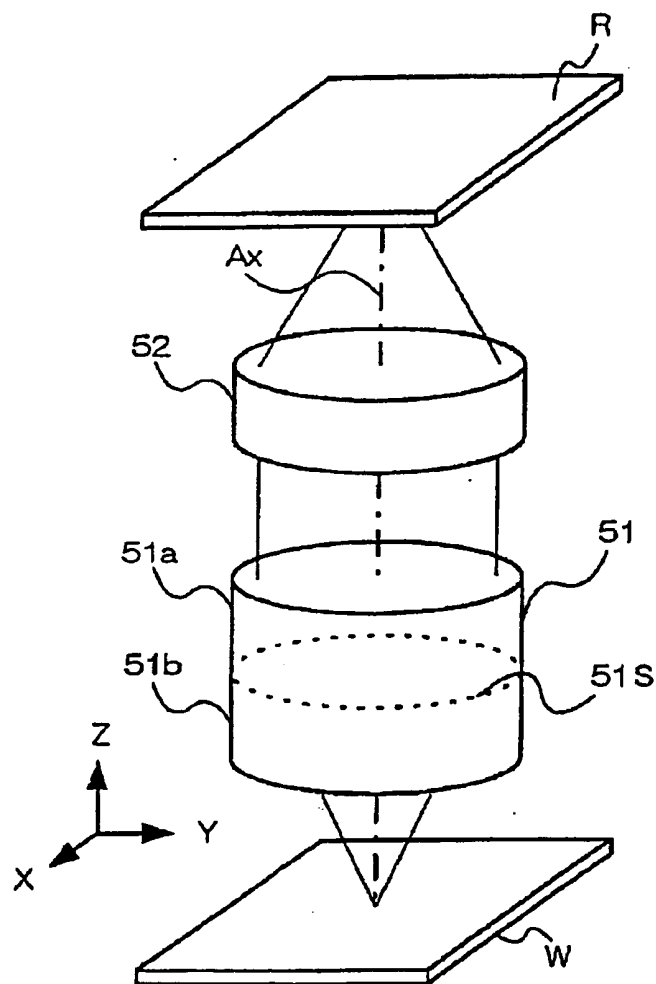


図18A

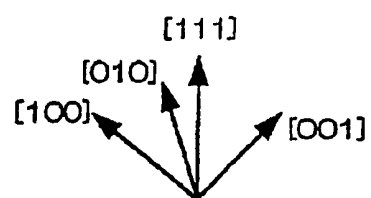


図18B

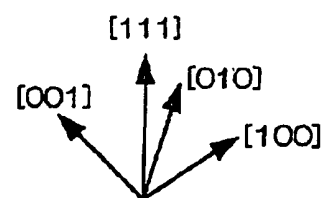


図18C

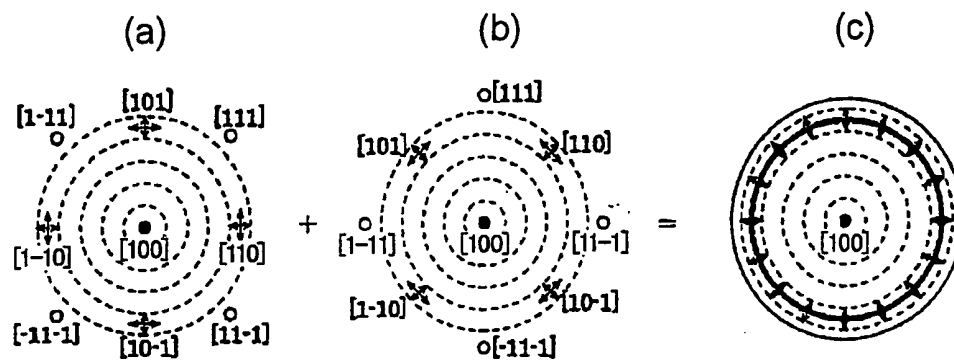


図19

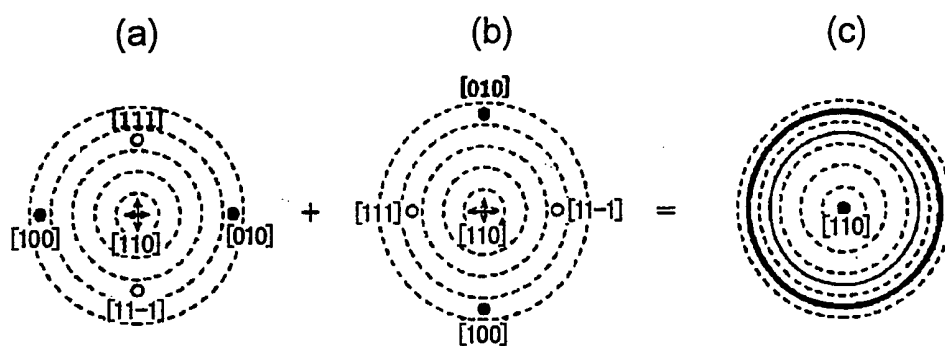


図20

図21

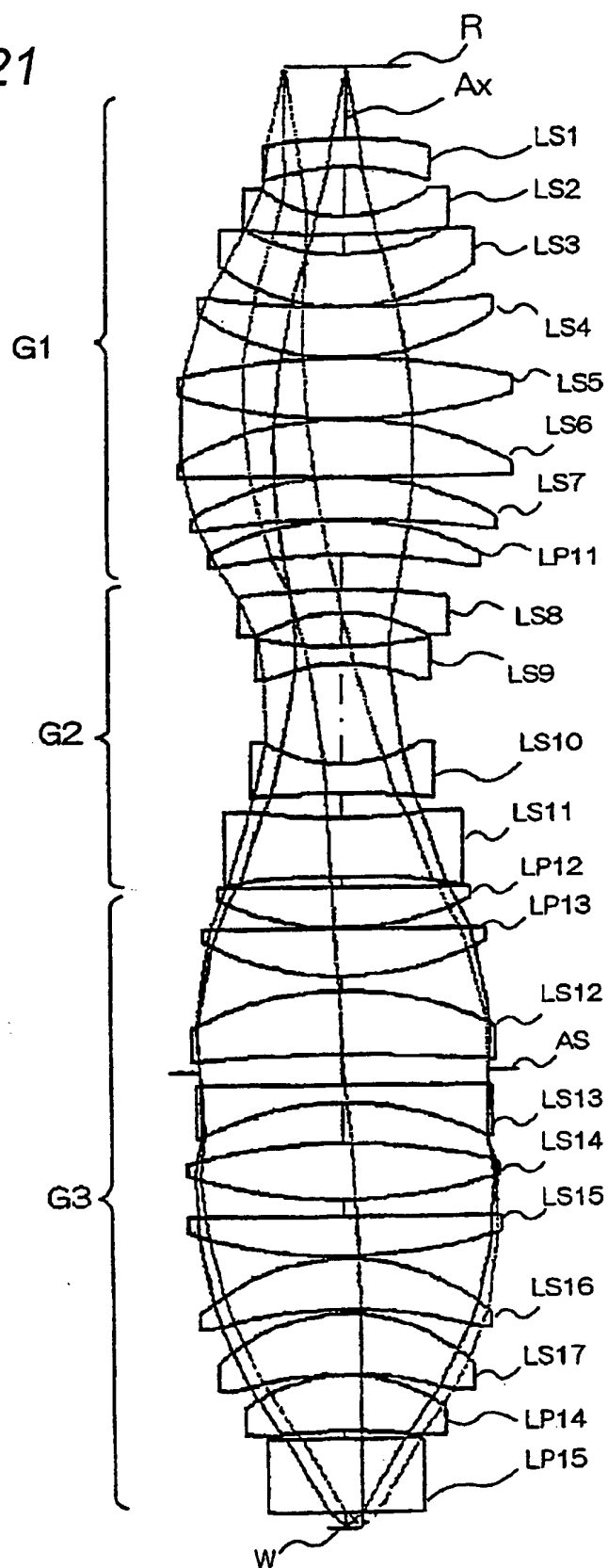


図22A

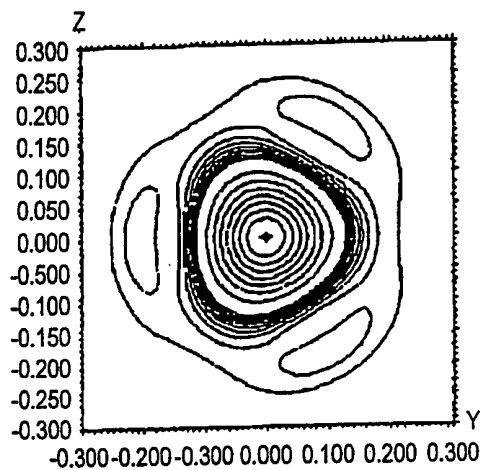


図23A

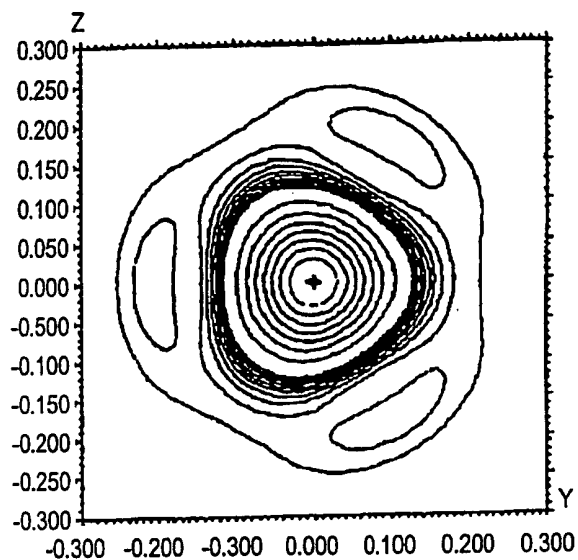


図22B

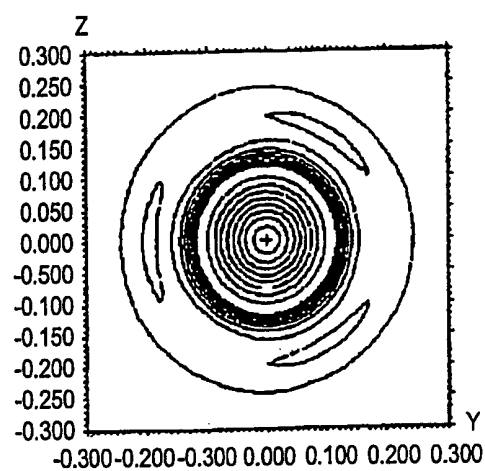


図23B

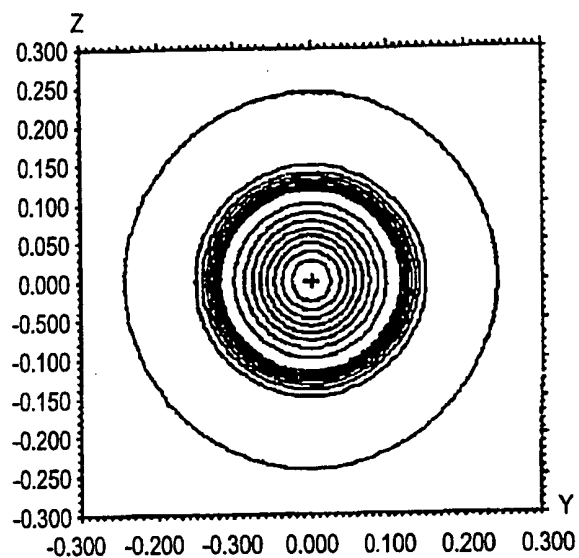


図22C

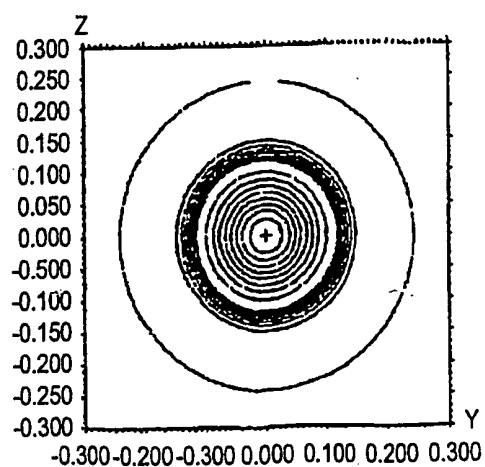
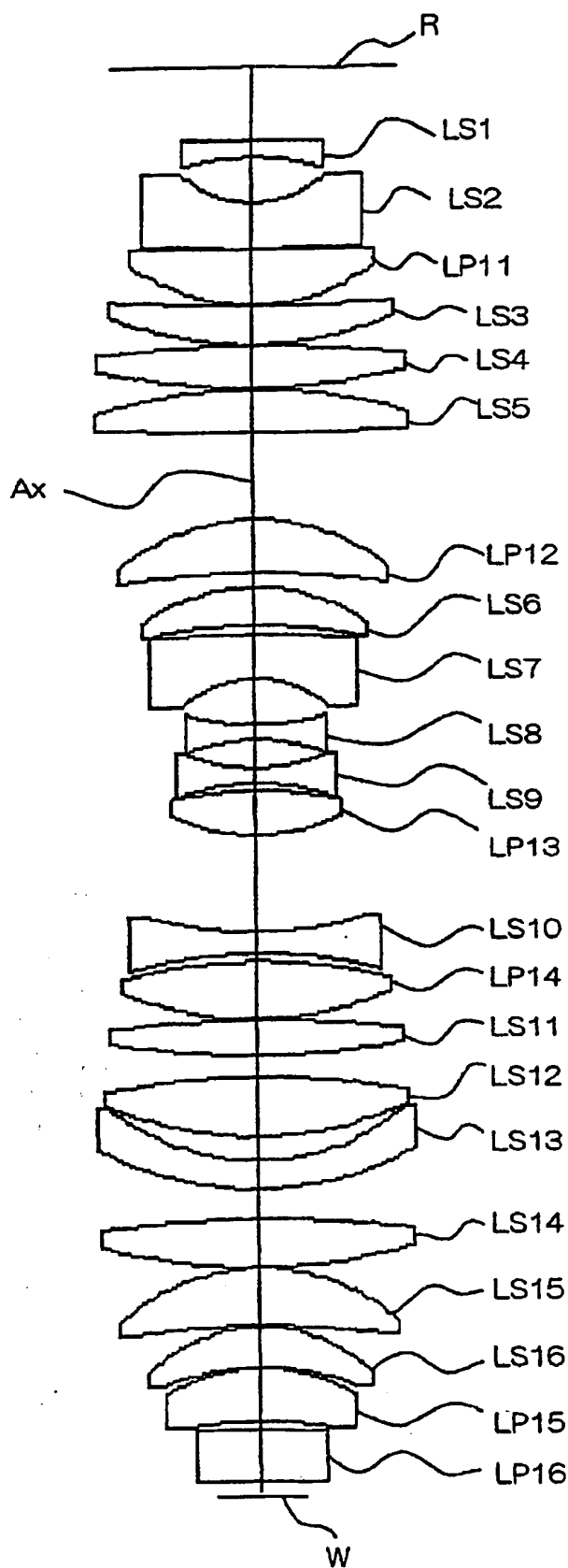


図24





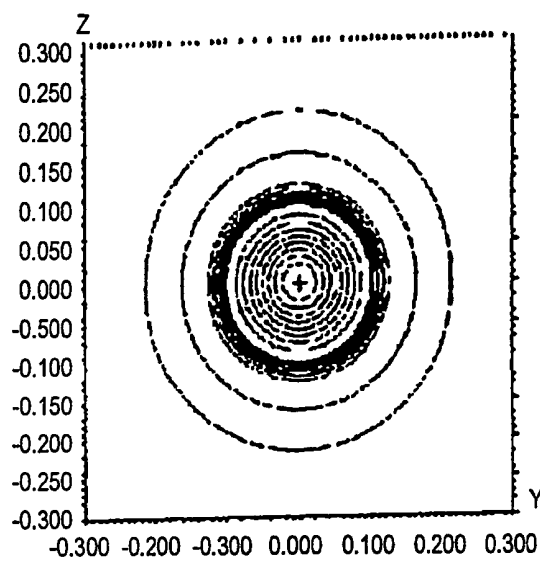


図25A

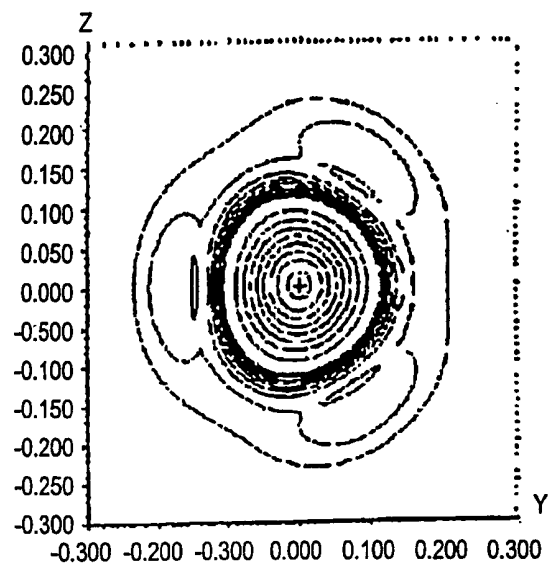


図25B

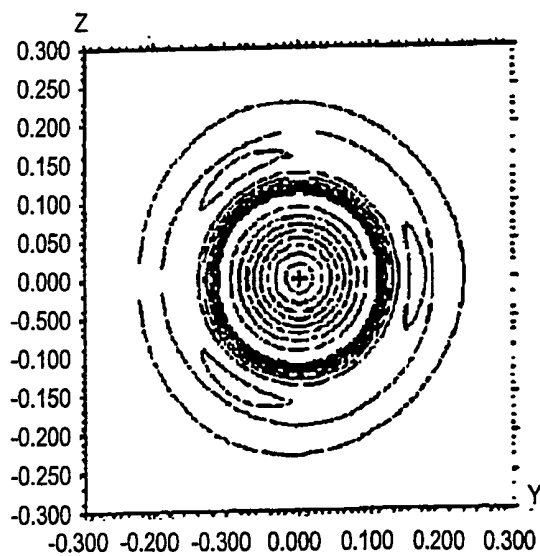


図25C

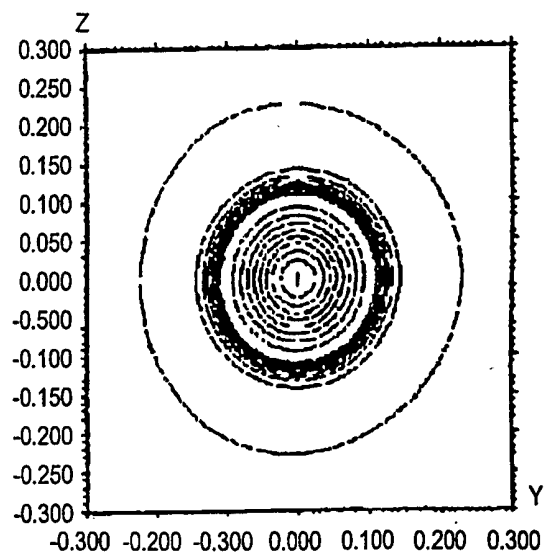


図25D

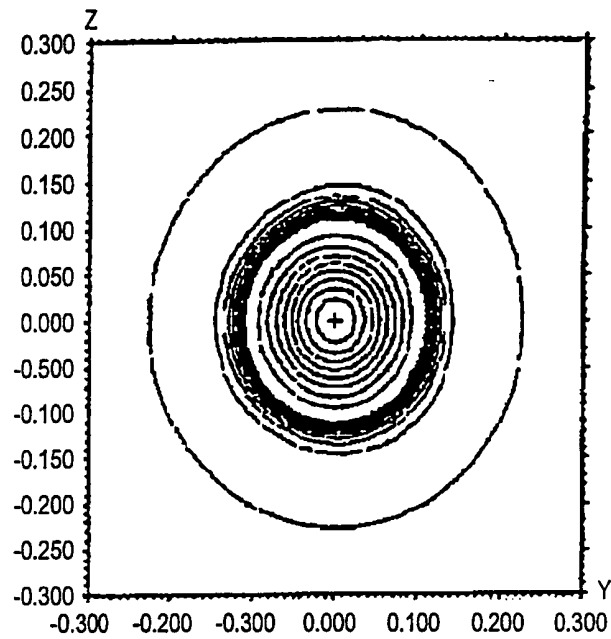


図26A

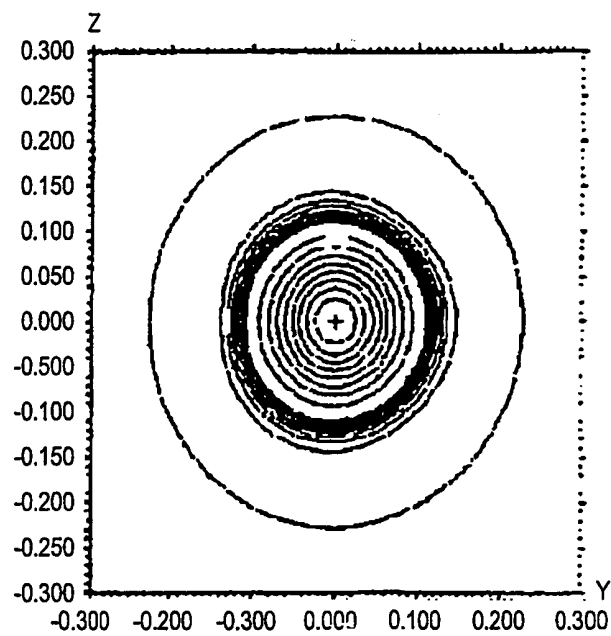


図26B

図27

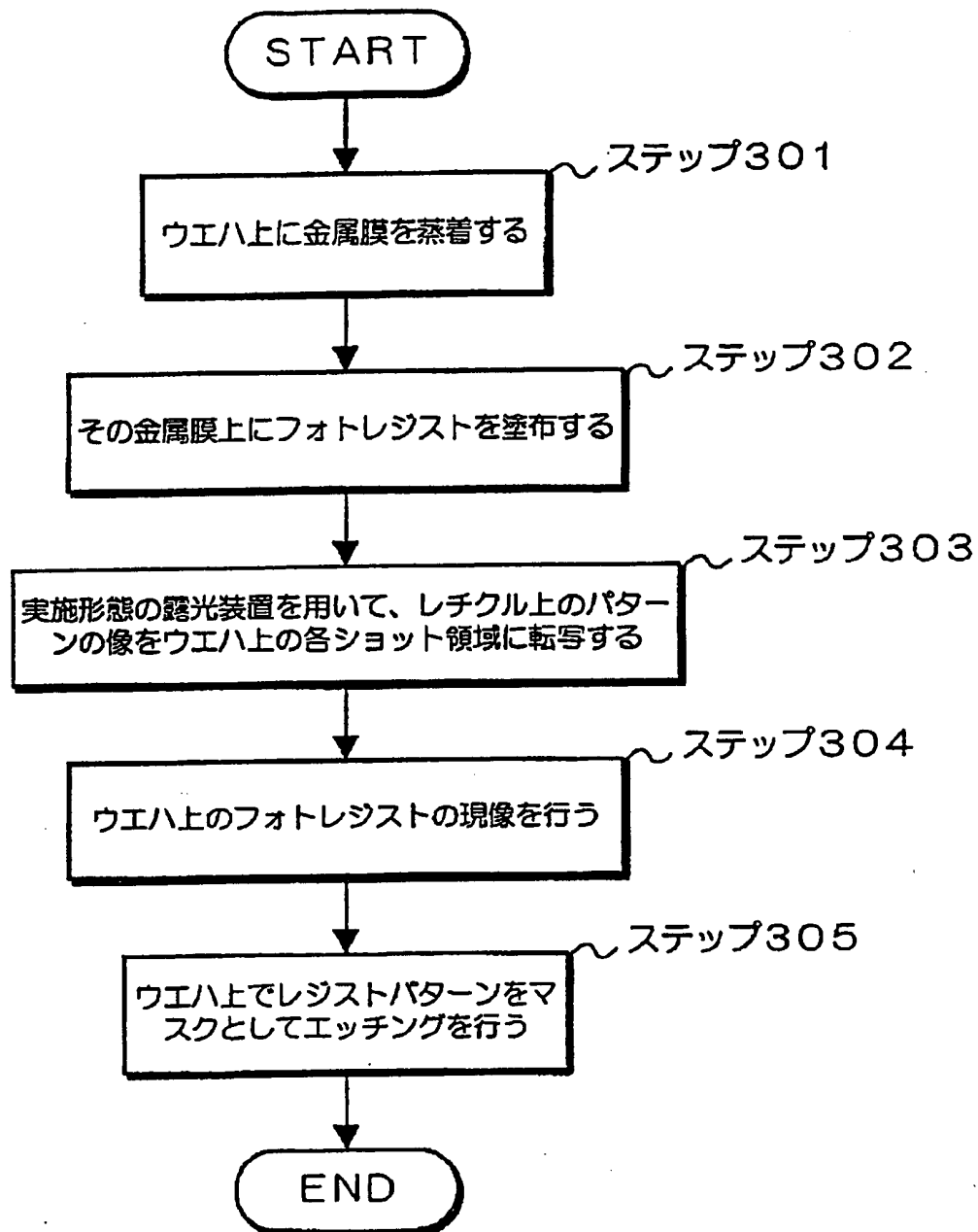
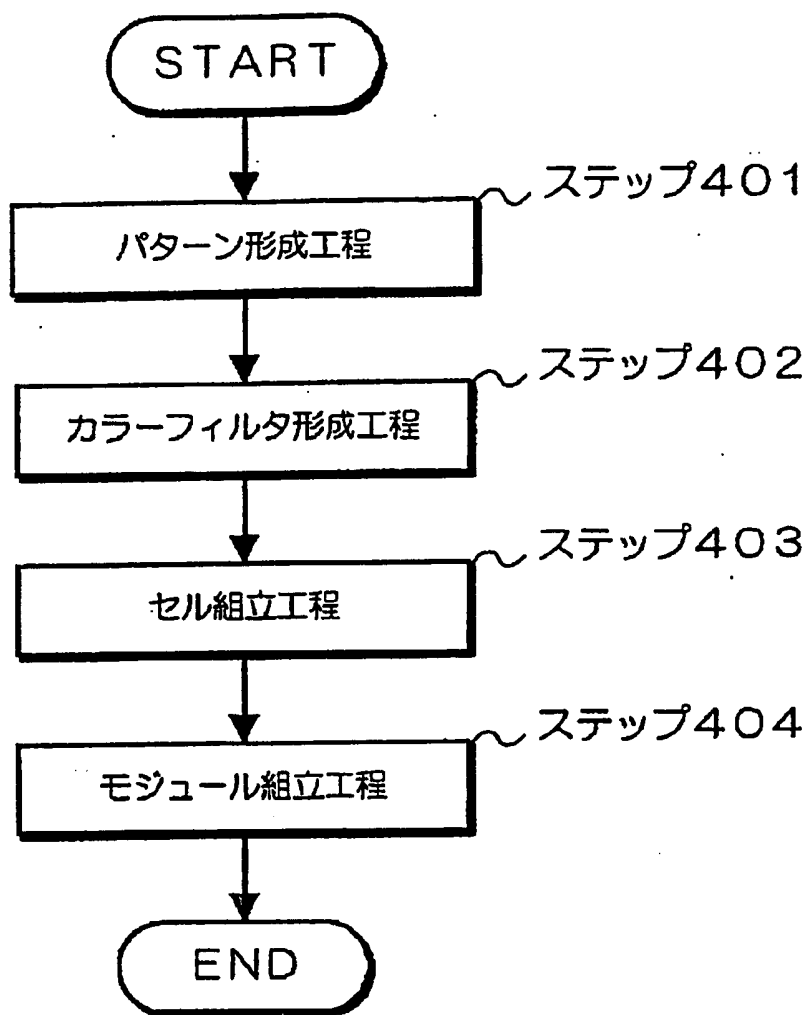


図28



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP02/07017

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl<sup>7</sup> G02B7/02, H01L21/029, G03F7/20, G02B13/24, G02B13/14,  
G02B1/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl<sup>7</sup> G02B7/02, H01L21/029, G03F7/20, G02B13/24, G02B13/14,  
G02B1/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2002  
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2002 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2002

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	WO 00/64826 A1 (Nikon Corp.), 02 November, 2000 (02.11.00), Full text; all drawings (Family: none)	1-47
Y	EP 1063684 A1 (Nikon Corp.), 27 December, 2000 (27.12.00), Full text; all drawings & WO 00/41226 A1 & AU 2000/18912 A & CN 1293822 A & KR 2001/088279 A & US 6366404 B1 & US 2002/0085176 A1	1-47
Y	JP 11-54411 A (Canon Inc.), 26 February, 1999 (26.02.99), Full text; all drawings (Family: none)	1-47

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention  
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone  
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art  
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
15 August, 2002 (15.08.02)

Date of mailing of the international search report  
27 August, 2002 (27.08.02)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP02/07017

## C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 6137626 A (Olympus Optical Co., Ltd.), 24 October, 2000 (24.10.00), Full text; all drawings & JP 11-72710 A	3
Y	JP 10-154657 A (Nikon Corp.), 09 June, 1998 (09.06.98), Full text; all drawings (Family: none)	6-9, 33, 34
Y	US 6201634 B1 (Nikon Corp.), 13 March, 2001 (13.03.01), Full text; all drawings & JP 11-326189 A & EP 942297 A2 & US 2001/0024314 A1 & US 6411384 B1	13, 21, 25-29, 38
Y	JP 07-283119 A (Hitachi, Ltd.), 27 October, 1995 (27.10.95), Par. No. [0007] (Family: none)	39, 40

## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> G02B7/02, H01L21/029, G03F7/20, G02B13/24  
G02B13/14, G02B1/02

## B. 調査を行った分野

## 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> G02B7/02, H01L21/029, G03F7/20, G02B13/24  
G02B13/14, G02B1/02

## 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年  
 日本国公開実用新案公報 1971-2002年  
 日本国登録実用新案公報 1994-2002年  
 日本国実用新案登録公報 1996-2002年

## 国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	WO 00/64826 A1 (株式会社ニコン) 2000. 11. 02, 全文全図 (ファミリーなし)	1-47
Y	EP 1063684 A1 (Nikon Corporation) 2000. 12. 27, 全文全図 & WO 00/41226 A1 & AU 2000/18912 A & CN 1293822 A & KR 2001/088279 A & US 6366404 B1	1-47

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)  
 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献  
 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

15. 08. 02

国際調査報告の発送日

27.08.02

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)  
 郵便番号 100-8915  
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

横林 秀治郎

印

2V 8411

電話番号 03-3581-1101 内線 3271

## C (続き) . 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
	& US 2002/0085176 A1	
Y	JP 11-54411 A (キヤノン株式会社) 1999. 02. 26, 全文全図 (ファミリーなし)	1-47
Y	US 6137626 A (Olympus Optical Co., Ltd.) 2000. 10. 24, 全文全図 & JP 11-72710 A	3
Y	JP 10-154657 A (株式会社ニコン) 1998. 06. 09, 全文全図 (ファミリーなし)	6-9, 33, 34
Y	US 6201634 B1 (Nikon Corporation) 2001. 03. 13, 全文全図 & JP 11-326189 A & EP 942297 A2 & US 2001/0024314 A1 & US 6411384 B1	13, 21, 25-29 38
Y	JP 07-283119 A (株式会社日立製作所) 1995. 10. 27, [0007], (ファミリーなし)	39, 40



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☒ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER: \_\_\_\_\_**

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**